INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | MUNDO CUÁNTICO | SEGURIDAD DE LAS CENTRALES NUCLEARES | CONSCIENCIA ARTIFICIAL | N.º 419 | AGOSTO 2011

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ENERGÍA
Seguridad de las centrales nucleares

EPIDEMIAS
El cáncer del diablo de Tasmania

BALLENAS
Biomecánica de una buchada perfecta

VIVIR EN UN Mundo Cuántico

El entrelazamiento se manifiesta también a escala macroscópica



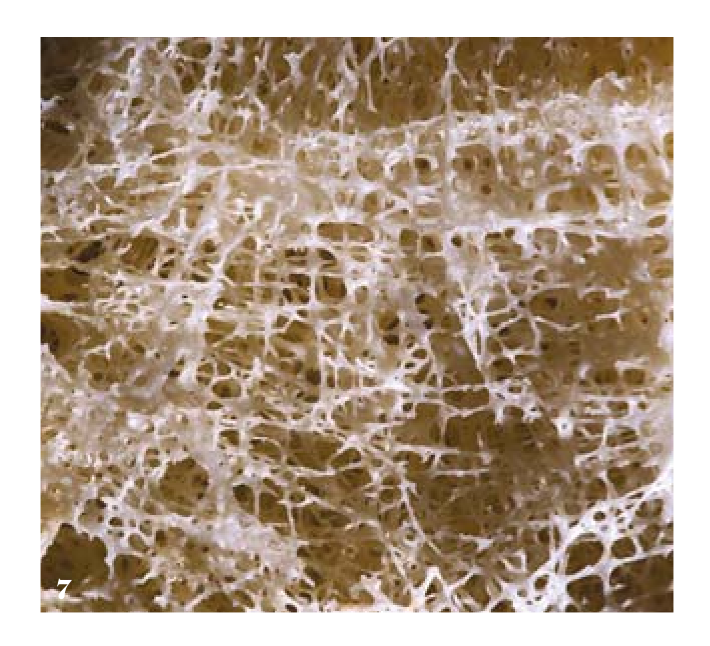
6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Agosto 2011, Número 419

28

ARTÍCULOS





7



44



88

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La mecánica cuántica ha sido considerada tradicionalmente como la teoría que describe el comportamiento del mundo microscópico. A lo largo de los últimos años, sin embargo, se han conseguido observar efectos puramente cuánticos en sistemas cada vez mayores: resonadores micrométricos, cristales macroscópicos y, quizás, en seres vivos. Ilustración de Kenn Brown, Mondolithic Studios.

redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2011

CUESTIÓN DE GUSTO

Discrepo de algunas de las opiniones expuestas por José Carlos Pinto de Oliveira en su artículo «Ciencia y arte: ¿vidas paralelas?» [Investigación y Ciencia, mayo de 2011]. No creo que la elección entre dos teorías científicas sea una mera cuestión de gusto. Pienso que los criterios para optar, por ejemplo, entre la teoría de los equilibrios puntuados o el neodarwinismo no pueden ser los mismos que los que determinan la preferencia por la música de Vivaldi o la de Ravel. La elección de tal o cual teoría científica depende fuertemente del hecho de que sus tesis reflejen con mayor precisión los fenómenos del mundo material. La visión aristotélica del cosmos, con sus esferas cristalinas y su intangible éter, puede ser estéticamente más bella que la copernicana, pero no es cierta, pues así no está organizado el sistema solar.

Guillermo Guevara Pardo
Bogotá

Responde Pinto de Oliveira: *Estoy de acuerdo con que la elección entre teorías científicas no se limita a una mera cuestión de gusto. Cuando Kuhn habla de la objetividad y la subjetividad, y cuando afirma que ciencia y arte no son dos polos opuestos, pretende decir que en el ámbito científico pueden darse circunstancias —como durante las revoluciones científicas— en las que la lógica no basta para establecer la superioridad de una teoría sobre otra. En tales casos, se recurre a elementos subjetivos, pero ello no significa que todos los criterios de elección sean un asunto de preferencias personales. Por otra parte, la negación de Kuhn de que ciencia y arte sean polos opuestos implica que tampoco en el arte la elección puede reducirse a una simple cuestión de gusto.*

HIPÓTESIS Y DOGMAS

El descubrimiento de la existencia de proteínas con estructuras tridimensionales no definidas lleva a afirmar a Santi Esteban, Carlos W. Bertoncini y Xavier Salvatella en «Proteínas escurridizas» [Investigación y Ciencia, junio de 2011] que esta nueva clase de proteínas desafían en parte el dogma central de la biología molecular, formulado por Francis Crick hace ya 53 años en «On protein synthesis» (*Symp. Soc. Exp. Biol.* vol. 12, 1958).

Conviene recordar que Francis Crick formuló dos principios generales a los que denominó «hipótesis de la secuencia» y «dogma central», y si bien ambos se refieren a la transferencia de información, no afirman lo mismo. El propio Crick lo recalcó en 1970, al notar que la hipótesis de la secuencia era una declaración en positivo (en su forma más simple, supone que la especificidad de un trozo de ácido nucleico se expresa solo por la secuencia de sus bases, la cual es un código para la secuencia de aminoácidos de una proteína), mientras que el dogma central supone una declaración negativa (la transferencia de proteína a proteína o de proteína a ácido nucleico es imposible). Además de ambos principios, Crick propone en el mismo artículo que la estructura tridimensional de las proteínas probablemente dependa simplemente del or den de sus aminoácidos. Por tanto, lo que podría transgredir la existencia de proteínas escurridizas sería esta última hipótesis, pero no el dogma central de la biología molecular.

Pese al descubrimiento de la transcriptasa reversa, los genes fragmentados, los ribozimas o los priones, el dogma central de la biología molecular —y, en gran medida, la hipótesis de la secuencia— goza de una salud razonablemente buena.

Vicente Tordera
y José E. Pérez-Ortín
Departamento de bioqumica
y biologa molecular
Universidad de Valencia

Responden Esteban, Bertoncini y Salvatella: *Agradecemos el comentario de los profesores Tordera y Perez-Ortín. La hipótesis de la secuencia y el dogma central describen únicamente las reglas generales para la transmisión de la información de la secuencia entre biopolímeros, y su vigencia es, en efecto, independiente de la existencia de la nueva clase de proteínas que mencionábamos en nuestro artículo. En 1958, cuando se enunciaron ambos conceptos, se creía que las proteínas adoptaban su estructura tridimensional de manera espontánea y que esta se hallaba estrechamente relacionada con su función. Como comenta Francis Crick en su artículo de 1970 «Central dogma of molecular biology» (*Nature*, vol. 227), esta hipótesis, entre otras, permitió reducir el problema de la transmisión de la información de tres dimensiones a una —es decir, a secuencias— y fue conceptualmente importante para el enunciado de la hipótesis de la secuencia y del dogma central.*

La existencia de proteínas que poseen una función biológica a pesar de no presentar una estructura tridimensional bien definida cuestiona sin duda la hipótesis de que las proteínas han de plegarse para tener una función, pero no desafía ninguno de estos dos importantes conceptos. Aclaramos, por tanto, que la frase de nuestro artículo debería afirmar: «Esta nueva clase de proteínas, que desafían la hipótesis de que las proteínas han de adoptar una estructura tridimensional bien definida para llevar a cabo su función, reciben el nombre de proteínas intrínsecamente desordenadas».



Junio 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

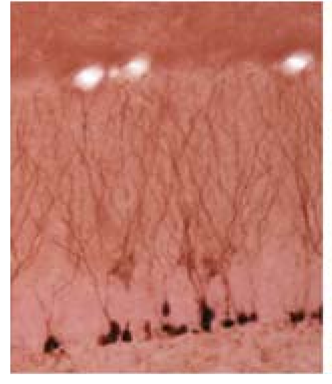
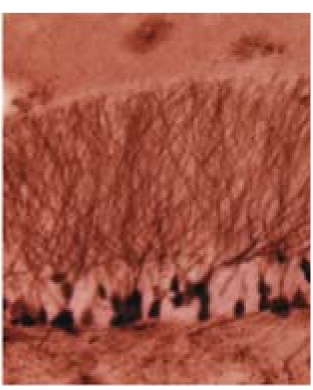
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

NEUROCIENCIAS

Cómo se recupera el cerebro

Durante la mayor parte del siglo pasado, los científicos estaban de acuerdo en que el cerebro de un adulto no producía nuevas neuronas. Se refutó esta teoría en la década de los noventa, pero siguió siendo un misterio la función que desempeñaban las nuevas neuronas en el cerebro adulto. Un estudio reciente sugiere que podría consistir en ayudar al encéfalo a recuperarse de lesiones traumáticas.

Cory Blaiss, entonces en el Hospital del Sudoeste de la Universidad de Texas, y sus colaboradores crearon ratones genéticamente modificados con tal de activar o desactivar a voluntad la neurogénesis en el hipocampo, región responsable del aprendizaje y la memoria. Les provocaron luego una lesión traumática en el cerebro. Compararon el desempeño de los ratones que podían producir nuevas neuronas con los que no eran capaces de hacerlo. Entonces hicieron que cada ratón atravesase por un laberinto acuático, en donde tenían que encontrar una plataforma oscura bajo la superficie de agua turbia. Observaron que, tras la lesión, solo los ratones con la neurogénesis intacta podían desarrollar una estrategia eficiente para encontrar la plataforma escondida, una habilidad basada en el aprendizaje espacial y la memoria. Llegaron a la conclusión de que sin neurogénesis en el hipocampo, la recuperación de las funciones cognitivas después de una lesión cerebral se veía perjudicada.

Un impulso para el crecimiento. Una lesión cerebral puede impulsar el desarrollo de nuevas neuronas (*derecha*). A la izquierda puede verse un cerebro sano.

El estudio podría favorecer el desarrollo de técnicas terapéuticas muy necesarias, ya que las dificultades de aprendizaje y de memoria asociadas con las lesiones cerebrales traumáticas son casi universales. La capacidad de estimular una neurogénesis más poderosa podría llevar a tiempos de curación más cortos y a una recuperación más completa de las funciones cognitivas. Un avance que cambiaría la vida a millones de personas que sufren lesiones cerebrales traumáticas cada año.

—Tim Requarth y Meehan Crist

MICROBIOLOGÍA

Las bacterias más listas

Eshel Ben-Jacob, profesor de física en la Universidad de Tel Aviv, no solo está interesado en el genoma de las bacterias que estudia, sino también en su personalidad. En diciembre de 2010, él y sus colaboradores publicaron un artículo en la revista *BMC Genomics* en donde explicaban que *Paenibacillus vortex*, una bacteria del suelo descubierta por Ben-Jacob a mediados de los noventa, era asombrosamente lista en comparación con otros microorganismos.

Identificaron ese grado relativo de inteligencia al comparar el genoma del *P. vortex* con el de otras 502 especies bacterianas. Basándose en esa comparación, calcularon lo que Ben-Jacob denomina «coeficiente intelectual social» de las bacterias. Contaron los genes asociados a las funciones sociales, como los que permiten que las bacterias se comuniquen, procesen la información ambiental y sinteticen productos químicos que resultan útiles al competir con otros organismos. *P. vortex* y otras dos cepas de *Paenibacillus* tienen un número mayor de ese tipo de genes que las otras 499 bacterias estudiadas, incluidas las patógenas, como *Escherichia coli*, lo cual indica la existencia de «capacidades sociales excepcionalmente brillantes».



Esa refinada capacidad social se manifiesta en las elaboradas colonias que forma *P. vortex*, como la de esta micrografía, que creció durante varios días en una placa de Petri. Tiene unos ocho centímetros de diámetro y contiene un número de bacterias cien veces superior al de humanos que pueblan la Tierra. Los puntos azules corresponden a grupos más densos de bacterias (vórtices), que se reúnen en torno a un centro para facilitar la expansión en superficies duras y para protegerse frente a peligros externos. Conforme las células se reproducen, cada vórtice aumenta de tamaño y se mueve hacia el exterior como una unidad, dejando tras de sí un rastro de células más antiguas, que ya no se reproducen y que forman ramales para mantener la comunicación en toda la colonia.

La acción conjunta de esos microorganismos les permite percibir el entorno, procesar información, resolver problemas y tomar decisiones, para así prosperar en entornos hostiles.

—Anna Kuchment

PSIQUIATRÍA

Tratar el síndrome de Tourette

El síndrome de Tourette suele ser especialmente agudo en los niños. Los tics físicos y vocales, que pueden obstaculizar la integración de los pequeños, resultan difíciles de tratar. Los medicamentos de primera línea ejercen un efecto limitado, mientras que los antipsicóticos más eficaces originan numerosos acontecimientos adversos a largo plazo, como una ganancia del peso corporal y alteraciones motoras. Las investigaciones están a punto de descubrir una nueva opción terapéutica a base de medicamentos ya existentes.

El año pasado, un equipo identificó una nueva mutación genética asociada al trastorno. Dirigidos por Matthew State, codirector del Programa de Neurogenética de Yale, los investigadores estudiaron el caso peculiar de una familia en la que un padre y sus ocho hijos sufrían el síndrome de Tourette. En ellos, el gen responsable de la producción de histamina en el cerebro era más corto de lo normal, lo que generaba una cantidad insuficiente del compuesto (que participa en la respuesta inflamatoria). State cree que ese déficit puede provocar tics, pero aún no ha identificado esa mutación genética en ninguna otra persona con el síndrome de Tourette.

Hace poco, se han descubierto rasgos paralelos entre esa familia y ratones con deficiencia de histamina, lo que ratifica la relación de la sustancia con el síndrome de Tourette. La mayoría de las personas afectadas exhiben un reflejo de sobresalto muy bajo, es decir, se asustan o distraen más fácilmente de lo normal, afirma Christopher Pittenger, director de la Clínica de Investigación del Trastorno Obsesivo-Compulsivo, de Yale. En mayo debía presentar nuevos datos a la Sociedad de Psiquiatría Biológica que demostraban que tanto la familia como los ratones sin el gen productor de histamina sufrían tics y un reflejo de sobresalto muy bajo. Otros experimentos han revelado que los medicamentos que favorecen la producción de histamina hacen disminuir los tics en ratones.

Se sabe que la histamina contribuye a las reacciones alérgicas y al insomnio, razón por la cual los antihistamínicos pueden comprarse sin receta. Pero también es un neurotransmisor que se halla en todo el cerebro, incluida una región asociada al síndrome de Tourette.

Los resultados apuntan a una posible alternativa a los antipsicóticos, que reducen los tics al inhibir la dopamina. Al descender los niveles de dopamina, los de histamina ascienden. Pero si se hiciera aumentar directamente la concentración de histamina sin inhibir la dopamina, se evitarían los efectos secundarios de los antipsicóticos. «Puede que ciertas personas con síndrome de Tourette experimenten otras alteraciones del sistema histamínico, de manera que un medicamento que estimulara la producción de histamina podría resultar beneficioso, pero aún es pronto para afirmarlo», señala Kevin McNaught, vicepresidente de los programas médicos y científicos de la Asociación del Síndrome de Tourette, con sede en Nueva York.

Ya se están realizando ensayos con medicamentos que aumentan la producción de histamina para tratar otras enfermedades neurológicas, así como el trastorno por déficit de atención e hiperactividad, que a menudo afecta a personas con el síndrome de Tourette.

—Sonya Collins

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Detectores de golpes marciales

Algunos maestros de taekwondo han perfeccionado tanto su técnica que, en ocasiones, incluso a un equipo de cuatro árbitros le cuesta controlar todo lo que sucede sobre el tatami. En vista de ello, Jin Y. Song, ingeniero eléctrico de Silicon Valley y cinturón negro de taekwondo, decidió inventar una interfaz hombre-máquina que solucionase el problema. El dispositivo incluye tres tipos de sensores —localizados en los protectores para la cabeza y torso—, imanes y transmisores inalámbricos. Su objetivo consiste en monitorizar los golpes sobre el cuerpo y la cabeza, pero solo aquellos asestados con gran rapidez. Si solo se trata de un empujón fuerte, el aparato no detecta nada. Ha de tratarse de un golpe veloz.

Los impactos en la cabeza son captados por detectores de aceleración, del mismo tipo que los que se encuentran en los airbags de los automóviles. Unos imanes instalados en los protectores para los pies alertan a otra clase de sensores de la inminencia de una patada, lo que, además, ayuda a distinguir entre golpes válidos y contactos accidentales con otras partes del cuerpo. (Una BlackBerry emplea la misma clase de imanes para apagarse cuando se desliza en la funda.) Por último, los transmisores inalámbricos envían señales a un ordenador desde el que los árbitros pueden seguir el combate.



N.º DE PATENTE 7.891.231 B2

El ingenio ya se ha empleado en varias competiciones, como en el Campeonato del Mundo Univeristario de Taekwondo, celebrado en Vigo en julio del año pasado, o en un importante torneo de artes marciales en Pekín. Song recibió la aprobación definitiva de la patente el pasado mes de febrero; ahora el Comité Olímpico Internacional está considerando la posibilidad de utilizarlo en los Juegos Olímpicos de 2012. Por su parte, Song intenta adaptar el dispositivo a otros deportes; entre ellos, el fútbol americano, en el que los participantes sufren con frecuencia conmociones cerebrales. Según el inventor, un sensor así quizá resultase útil para monitorizar los golpes en la cabeza.

—Adam Piore

THOMAS FUCHS (*arriba*); OFICINA DE PATENTES DE EE.UU. (*abajo*)

AGENDA

CONGRESOS

Del 22 al 30 de agosto
XXII Congreso de la Unión Internacional de Cristalografía
Palacio Municipal de Congresos
Madrid
www.iucr2011madrid.es

EXPOSICIONES

Hasta del 7 de agosto
100 años de la aviación militar española
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



Hasta el 26 de agosto
Lo que Darwin no pudo ver
Organiza: Instituto de Ciencias del Mar (CSIC)
La Fábrica del Sol
Barcelona
www.icm.csic.es/icmdivulga

Entre moléculas.
Año Internacional de la Química. CSIC
Museo de la ciencia y el Agua
Murcia
www.cienciayagua.org

¿Acuicultura? Descúbrela
Museo Elder de la Ciencia y la Tecnología
Las Palmas de Gran Canaria
www.museoelder.org

OTROS

Del 1 al 5 de agosto - Curso
Viendo pasar la vida: desarrollo evolutivo y psiquiatría de la infancia y adolescencia
Cursos de verano de El Escorial
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.ucm.es/cursosverano

Del 28 de agosto al 9 de septiembre - Seminario
Ecuaciones diferenciales parciales
Centro de Ciencias de Benasque Pedro Pascual
Benasque
benasque.org/2011pde

MATEMÁTICAS

Bayes contraataca

Google cuenta con una pequeña flota de coches robóticos que, desde el pasado otoño, han recorrido miles de kilómetros por las calles del norte de California sin atropellar a nadie, sin saltarse un semáforo y sin preguntar cómo se llega a algún sitio. Su capacidad para analizar enormes cantidades de datos procedentes de cámaras, radares y medidores láser de distancias se basa en el teorema de Bayes, formulado en el siglo XVIII por el clérigo inglés Thomas Bayes. Tras años de controversias y marginación, el teorema se ha convertido en la piedra angular de algunos de los proyectos robóticos más refinados.

La ecuación que condensa la esencia del teorema puede traducirse a un enunciado simple: creencias iniciales + datos objetivos recientes = una creencia nueva y mejorada. Una de sus versiones modernas se debe a Pierre-Simon Laplace, quien, tras volver a usar la ecuación cada vez que conseguía nuevos datos, lograba distinguir las hipótesis con una alta probabilidad de ser ciertas de otras menos válidas. Una de sus aplicaciones permitió explicar por qué en París a finales del siglo XVIII nacían más niños que niñas. Después de recopilar datos demográficos de todo el mundo durante treinta años, llegó a la conclusión de que la proporción entre niños y niñas es común a toda la humanidad y se encuentra determinada por la biología.

Muchos teóricos de la estadística han achacado a los métodos bayesianos su carácter subjetivo. Sin embargo, los expertos en toma de decisiones insisten en que arrojan gran claridad cuando la información resulta escasa y los resultados se antojan inciertos. Durante los años setenta, John Nicholson, comandante de la flota de submarinos de EE.UU. en el Mediterráneo, recurrió a un análisis informático bayesiano para estimar los itinerarios más probables de los submarinos nucleares soviéticos. Hoy en día, la matemática bayesiana ayuda a separar el correo electrónico basura de los mensajes fidedignos, a evaluar riesgos sanitarios y de seguridad nacional, o a descifrar el ADN.

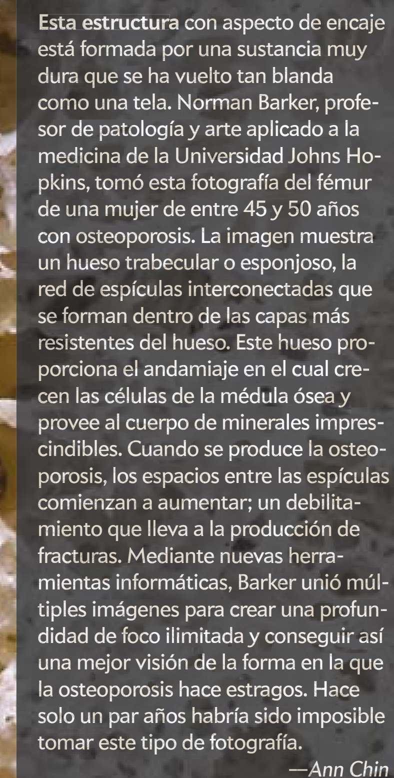
Además, según afirma Sebastian Thrun, director del Laboratorio de Inteligencia Artificial de la Universidad de Stanford y del proyecto de vehículos sin conductor de Google, el teorema de Bayes ha revolucionado la robótica. Al expresar toda la información en términos de distribuciones de probabilidad, el teorema genera estimaciones fiables a partir de datos escasos e inciertos. Gracias a los sensores colocados sobre los vehículos, los coches sin conductor de Google actualizan la información de los mapas con nuevos datos sobre las carreteras y el tráfico. La multinacional espera que, algún día, sus vehículos robóticos reduzcan a la mitad el número de víctimas del tráfico, ahorren energía, optimicen la circulación durante los atascos y permitan a las personas emplear su tiempo en actividades más productivas, como hallar nuevas aplicaciones de un teorema que ya cuenta con 250 años de antigüedad.

—*Sharon Bertsch McGrayne*



PARQUE DE LAS CIENCIAS DE GRANADA (*exposición*); CORTESÍA DE GOOGLE (*coche*)

¿QUÉ ES ESTO?

Esta estructura con aspecto de encaje está formada por una sustancia muy dura que se ha vuelto tan blanda como una tela. Norman Barker, profesor de patología y arte aplicado a la medicina de la Universidad Johns Hopkins, tomó esta fotografía del fémur de una mujer de entre 45 y 50 años con osteoporosis. La imagen muestra un hueso trabecular o esponjoso, la red de espículas interconectadas que se forman dentro de las capas más resistentes del hueso. Este hueso proporciona el andamiaje en el cual crecen las células de la médula ósea y provee al cuerpo de minerales imprescindibles. Cuando se produce la osteoporosis, los espacios entre las espículas comienzan a aumentar; un debilitamiento que lleva a la producción de fracturas. Mediante nuevas herramientas informáticas, Barker unió múltiples imágenes para crear una profundidad de foco ilimitada y conseguir así una mejor visión de la forma en la que la osteoporosis hace estragos. Hace solo un par años habría sido imposible tomar este tipo de fotografía.

—Ann Chin

BOTÁNICA

Base genética de las frutas sin semillas

Mark Twain llamó a la chirimoya y a su pariente, la anona, «la frutas más deliciosas que el ser humano haya conocido». Si bien resultan exóticas para muchos, estas frutas de la familia *Annona* se han cultivado en Centroamérica y Sudamérica durante generaciones. Incluso en la época precolombina, la chirimoya y la anona fueron degustadas por su textura cremosa y por un sabor parecido a una mezcla de plátano y piña. Sin embargo, también contienen numerosas semillas duras que las hacen difíciles de comer. Aunque se hayan cultivado frutas sin semillas durante miles de años (uvas, sandías), no se ha identificado todavía la causa por la que estas no se forman.

Hasta que un día un agricultor español que cultivaba anonas identificó una extraña fruta sin pepitas. Consultó a los expertos, que estudiaron la planta. J. Lora y J. I. Hormaza, del Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea «La Mayora» del CSIC, M. Herrero, de la Estación Experimental «Aula Dei» del CSIC, y Charles Gasser, de la Universidad de California en Davis, descubrieron la mutación genética que le permite producir frutas sin semillas. El estudio, publicado en marzo en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, revela la base molecular de la ausencia de semillas. Es la primera vez que se logra para una fruta.

Ese conocimiento servirá para crear otras variedades de frutas sin semillas, como chirimoyas y tomates, que hasta ahora se habían resistido a las técnicas tradicionales de cultivo. Las semillas resultan fundamentales para la formación de la fruta, ya que suelen emitir señales hormonales que hacen que esta se genere. Algunas plantas con frutas, como el plátano, contienen una mutación genética que permite la formación de la fruta sin desarrollo de semilla. En otras, como la sandía, una pequeña parte de la semilla permanece intacta y desencadena la cascada hormonal que impulsa el desarrollo de la fruta. Ahora contamos con una nueva pieza del rompecabezas.

—Carrie Arnold

NORMAN BARKER (*fémur*); AURORA PHOTOS (*chirimoya*)

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Cómo medir el viento en Marte

Un chip de silicio y platino permitirá estudiar la dinámica atmosférica del planeta rojo

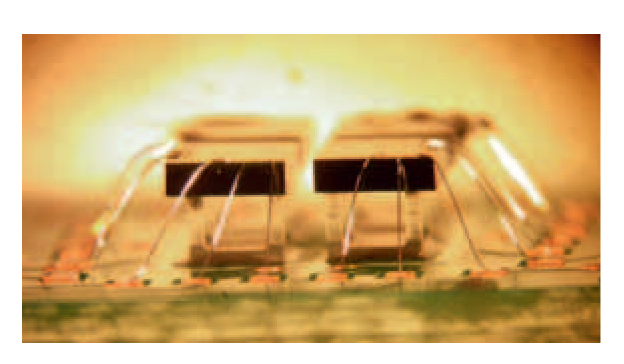
A finales de este año, la NASA tiene previsto lanzar el Laboratorio Científico para Marte (MSL), una misión cuyo objetivo consistirá en estudiar la idoneidad pasada y presente del entorno marciano para albergar vida microscópica. Con ese fin, el vehículo explorador *Curiosity* recorrerá la superficie del planeta vecino para obtener información detallada sobre la composición del suelo y las características del clima. En particular, *Curiosity* se encargará de investigar la dinámica atmosférica en Marte, para lo cual irá equipado con un sensor de viento cuyo componente principal, un *chip UPC*, ha sido diseñado y fabricado por nuestro laboratorio.

Hasta donde sabemos, la atmósfera de Marte se compone casi en su totalidad de dióxido de carbono, su temperatura media asciende a 63 grados bajo cero y su presión oscila entre 600 y 1000 pascales. Una presión atmosférica tan baja (a efectos de comparación, la terrestre supera los 100.000 pascales) implica grandes dificultades a la hora de estudiar las propiedades del aire, puesto que limita en grado sumo la interacción entre las moléculas del entorno y cualquier dispositivo.

La mayoría de los datos de los que disponemos sobre el viento marciano fueron tomados por un anemómetro térmico a bordo de la sonda *Viking* en 1976.



Sobre el terreno: Representación artística del vehículo de exploración *Curiosity*. La misión MSL planea partir con él hacia el planeta rojo a finales de este año.



El chip UPC: Resistencias de platino sobre una superficie de silicio calientan el chip y miden su temperatura con gran precisión. La cantidad de energía térmica cedida al entorno aporta información sobre la velocidad del viento.

El método térmico se basa en la refrigeración que experimenta toda superficie caliente cuando se ve expuesta a la acción del viento. En la práctica, se eleva la temperatura del sensor por encima de la del entorno y se efectúa una lectura electrónica de la potencia necesaria para mantenerlo caliente; de esta manera se obtiene información sobre la velocidad del aire. En comparación con otras técnicas, este método proporciona resultados de gran precisión, requiere poca potencia y no consta de partes móviles, propiedades que lo hacen idóneo para los instrumentos espaciales. En el caso de la misión MSL, las limitaciones de peso, consumo de potencia y tamaño fijaron los parámetros fundamentales de nuestro chip en 1,5 milímetros de lado y un consumo máximo de 1 milivatio por cada grado de incremento de temperatura con respecto a la ambiente.

El chip consta una superficie de silicio sobre la que se han depositado películas de platino grabadas con la geometría y dimensiones adecuadas para que operen como resistencias eléctricas. Su misión consiste, por un lado, en calentar el chip cuando por ellas circula una corriente eléctrica; por otro, en medir la temperatura del dispositivo. Esto último se logra gracias a que la resistividad del platino es una función lineal de la temperatura. Por último, la gran conductividad térmica del silicio implica una distribución muy homogénea de la temperatura en todo su volumen, por lo que el chip se comporta como un punto caliente inmerso en el dióxido de carbono de la atmósfera marciana.

Dado que el funcionamiento del chip es isótropo, para determinar la dirección del viento se requieren varios de ellos. El sensor incorpora cuatro chips en disposición coplanar, lo que le confiere una sensibilidad bidimensional. Para medir la componente vertical, se emplazan tres de estos conjuntos a diferentes ángulos.

Otro inconveniente, debido también a la baja presión de la atmósfera de Marte, radica en que la transferencia de calor del chip al medio es muy baja; de hecho, resulta equiparable a la que existe entre el chip y el soporte. Ello implicaría un rendimiento muy pobre entre la potencia consumida por el chip y la transferida por convección al fluido, la cual supone el objeto de la medida. Para solucionarlo, entre el dispositivo y el soporte se inter-

NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO-CALTECH (*Curiosity*); MNT/UPC (*chip*)

pusieron estructuras aislantes de muy baja conductividad térmica.

Debido a las severas restricciones de peso y tamaño a las que se ven sometidos los instrumentos espaciales, estos han de emplear una electrónica específica que permita generar, en pocos pasos, una señal digital que pueda ser procesada. En nuestro caso, ello se consiguió gracias a una configuración especial, denominada «lazo sigma-delta», la cual se basta con un contador simple para la lectura digital de la potencia instantánea consumida por cada sensor.

El sensor de viento será uno de los componentes de la estación meteorológica del *Curiosity* (REMS, por sus siglas en inglés), que ha sido fabricada por un consorcio español liderado por el Centro de Astrobiología (CAB), el cual ha participado en la financiación del proyecto, junto con el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI). Tras fabricar más de un millar de chips, nuestro laboratorio seleccionó aquellos con las tolerancias más bajas y los entregó al CAB y a la empresa de aplicaciones espaciales EADS-CRISA para su posterior ensamblaje en los modelos de vuelo.

—Luis Castañer
Grupo de micro y nanotecnologías
Departamento de ingeniería electrónica
Universidad Politécnica de Cataluña

BIOLOGÍA CELULAR

Competición celular: las guerras floridas

Se han descubierto los mecanismos que permiten a las células de un tejido comunicar su estado de salud, así como ganar tiempo antes de ser eliminadas por sus vecinas sanas

Una sociedad podría definirse como un conjunto de organismos que deciden abandonar la libertad de la que dispondrían en su estado natural a cambio de ciertos derechos y beneficios que les reportan el vivir en sociedad, lo que se conoce como contrato social. Atendiendo a ese principio, un organismo pluricelular representaría un conjunto de células que en un momento de la evolución decidieron dejar de competir entre sí y convivir de una forma ordenada.

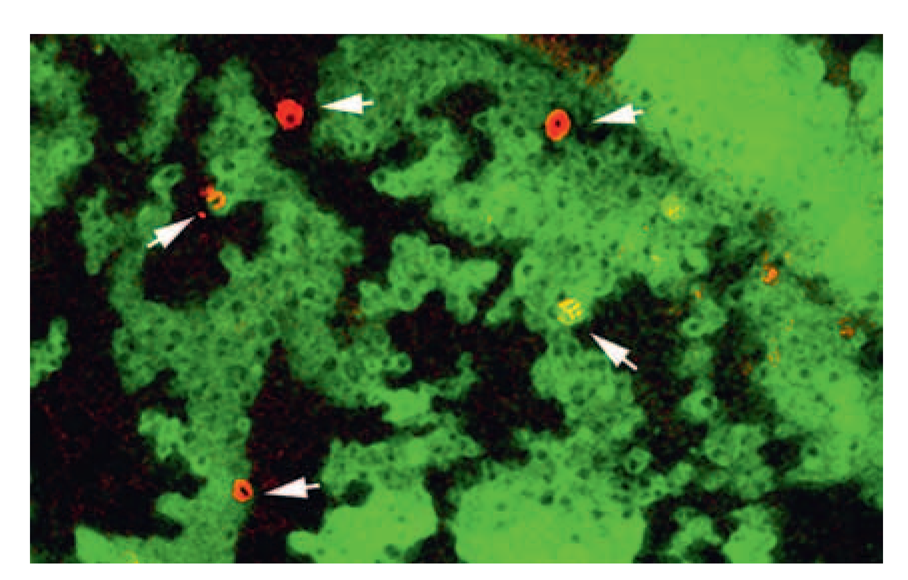
Una de las consecuencias derivadas de la vida en sociedad es la aparición de células de menor calidad, o peligrosas, que disminuyen la viabilidad del organismo al actuar como una rémora para las demás. Por tanto, resultaría beneficioso que los organismos multicelulares dispusieran de un mecanismo para eliminar aquellas células menos idóneas o peligrosas. El concepto de destrucción de las células más débiles a favor de las más fuertes es el fundamento de la competición celular.

Numerosas mutaciones convierten a las células en aberrantes o peligrosas. Sin embargo, el mecanismo molecular por el que se eliminan las células viables del organismo había permanecido oculto desde hacía tiempo. El pasado año se publicaron dos artículos, basados en el modelo genético *Drosophila melanogaster*, que han ayudado a conocer con mayor detalle los protagonistas moleculares del proceso. En particular, se han descubierto dos proteínas: Flower y Sparc. Si viésemos el proceso como una guerra entre células, Flower funcionaría como un arma y Sparc como un escudo molecular.

Armas y escudos

Se ha descrito un código de comunicación celular basado en las diferentes formas (isoformas) de la proteína Flower (Fwe). El nombre de la proteína (flor en inglés) procede de la analogía con las «guerras de las flores», «guerras floridas» o Xōchiyaoyōtl, un tipo de guerra ritual de los pueblos aztecas y sus vecinos, anterior a la llegada de los españoles. Las guerras de las flores tenían la peculiaridad de que a los perdedores no se les mataba a en el campo de batalla, sino que se les marcaba con pintura azul y, posteriormente, si se daban una serie de circunstancias durante el ritual, se sacrificaban para apaciguar a los dioses. De modo semejante, las células utilizan las proteínas Flower para luchar entre sí: primero, marcan a las células perdedoras con las isoformas Lose y, eventualmente, matan a esas células marcadas. Pero, como en las guerras floridas, la muerte de las células perdedoras no ocurre de modo inmediato y depende de una serie de acontecimientos.

De forma general, una célula sana presenta o expone en su superficie una forma proteica denominada «ubi», o ubicua (Fwe^{ubi}). Sin embargo, cuando una célula sufre un daño que se traduce en una dis-



Tejido en competición. Las células sanas (*negro*) destruyen las células menos sanas (*verde*). La muerte de estas últimas (*rojo, flechas blancas*) se produce principalmente en la zona de contacto con las células sanas. (El tejido corresponde al disco imaginal de ala de *Drosophila melanogaster*.)

FUENTE: «FLOWER FORMS AN EXTRACELLULAR CODE THAT REVEALS THE FITNESS OF A CELL TO ITS NEIGHBORS IN DROSOPHILA». C. RHINER ET AL. EN *CELL*, 2010

minución de su capacidad competitiva, cambia la forma «ubi» por otras denominadas «Lose» (Fwe^{LoseA} o Fwe^{LoseB}), que marcan a la célula para ser destruida. El código funciona a modo de etiquetas de calidad celular individualizadas, con lo que se facilita el desarrollo normal del proceso.

No obstante, una marca Lose en la superficie celular no conduce necesariamente a la muerte de las células que la presentan. Se trataría más bien de un sistema de muerte «social»: la célula marcada no se llegaría a destruir si se hallara rodeada por células con su misma marca (Lose). Dicho de otro modo, si por algún motivo un tejido o zonas extensas del mismo se vieran marcadas con la etiqueta Lose, ello no se traduciría en una muerte generalizada del conjunto de células, lo que favorecería la supervivencia del individuo ante situaciones de estrés o daño masivo.

La proteína Sparc actuaría, en cambio, a modo de escudo molecular. Evitaría la eliminación de las células que sufren fluctuaciones no permanentes en su capacidad competitiva. Así, si una célula experimentara un daño transitorio, aumentaría en ella la producción de la proteína Sparc. Esta retrasaría la eliminación de la célula con el objetivo de darle tiempo para que se pudiera recuperar.

Supercompetición en el cáncer

Del mismo modo en que el sistema funciona en favor de las células normales de un tejido, a veces se generan situaciones en que las células mutadas destruyen las células normales, un proceso conocido como «supercompetición». Así, si una célula adquiriese una mutación que aumentase su capacidad competitiva, podría expandirse en el tejido a expensas del tejido normal circundante. Ahora, esa masa creciente de células mutadas (precancerosas) tendería a adquirir segundas y terceras mutaciones que la convertirían en una amenaza real para la salud del organismo. La relevancia de las moléculas mencionadas en el cáncer queda patente en el hecho de que Sparc ya se venía utilizando como factor de prognosis en diversos tipos de tumores. Además, se ha comprobado que una disminución de los niveles de Flower reduce sensiblemente la expansión clonal de las células precancerosas en el tejido.

Posiblemente nos hallemos ante el comienzo de una serie de descubrimientos que nos ayuden a comprender más en detalle la complejidad y las consecuencias de las relaciones sociales entre nuestras células, lo que ampliaría sin duda nuestro entendimiento y capacidad de actuación ante enfermedades de tanta importancia como el cáncer.

—Eduardo Moreno
Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), *Madrid e IZB-Universidad de Berna*
Jesús María López-Gay, CNIO

ECOLOGÍA

Redes tróficas marinas

Su organización por compartimentos les confiere mayor robustez ante las perturbaciones

Los océanos cubren más de dos tercios de la superficie terrestre. Los ecosistemas marinos son fundamentales para el hombre, pues, entre otras funciones, operan a modo de fuente de alimentos y de sumidero del CO$_2$ que resulta de la quema excesiva de combustibles fósiles. Sin embargo, a pesar de su importancia, se han estudiado poco. Se han descrito alrededor de 300.000 especies marinas (el 15 por ciento de las especies que pueblan el planeta), mientras que la biodiversidad total oceánica se estima en más de 10 millones de especies. Asimismo, actividades humanas como la sobrepesca, el desarrollo de regiones costeras, la contaminación y la introducción de especies exóticas ha resultado en un declive de las poblaciones de numerosas especies y en la extinción de otras.

Debido, en parte, a las complejas relaciones de interdependencia entre especies, se desconocen las implicaciones de esas actividades a medio y largo plazo. Relaciones como las que existen entre depredadores y presas conllevan que, al extinguirse una especie, otras se vean afectadas en menor o mayor grado; en un efecto dominó, lo que le ocurre a una especie puede propagarse por la comunidad. La magnitud de este impacto depende en gran medida del tipo, tamaño y estructura de las redes de interacción. Por ello este tipo de cuestiones se abordan con herramientas matemáticas utilizadas en el estudio de redes complejas como, por ejemplo, Internet. Mediante estas herramientas se intenta determinar qué características estructurales son comunes a distintos ecosistemas, estudiar los procesos que subyacen bajo esa estructura, comprender sus consecuencias y determi-

En este esquema de una red trófica marina del Caribe se observa la estructura compartimentada típica de este tipo de redes. Los nodos de distinto color representan especies pertenecientes a diferentes compartimentos; cada línea de unión, una interacción entre depredador y presa. Las especies se dividen en: no peces (*cuadrados*), peces óseos (*círculos*) y tiburones (*triángulos*).

ADAPTADA DE «COMPARTMENTS IN A MARINE FOOD WEB ASSOCIATED WITH PHYLOGENY, BODY MASS, AND HABITAT STRUCTURE» EN *ECOLOGY LETTERS* N.º 12, PÁGS. 779-788, 2009

nar qué especies son más importantes para el funcionamiento y estabilidad de los ecosistemas.

Hoy sabemos que las redes tróficas marinas de gran tamaño presentan características estructurales generales. Predominan las cadenas tróficas cortas; ello implica que son necesarios pocos consumidores intermedios para que los nutrientes generados en la base de la cadena alimenticia sean asequibles a superdepredadores como los tiburones. Los consumidores tienden a alimentarse de varias especies; ello resulta en redes con una alta conectividad formadas en su mayoría por interacciones débiles, ya que estos no dependen exclusivamente de un solo recurso. La distribución de estas interacciones es extremadamente asimétrica, puesto que la mayoría de las especies establecen pocas interacciones mientras que un pequeño número de ellas aglutinan la mayor parte de las interacciones presentes en la red. La predominancia de cadenas tróficas cortas, interacciones débiles y especies marginales tiende a amortiguar potenciales efectos de cascadas, lo que resulta en redes robustas ante perturbaciones menores.

Compartimentación

Investigaciones recientes sugieren, además, que, en ecosistemas de gran diversidad, esas redes tróficas se hallan organizadas en compartimentos, es decir, en grupos de especies altamente conectadas entre sí pero con escasos vínculos tróficos con especies de otros grupos. Sin embargo, se desconocen los mecanismos que generan dicha estructura.

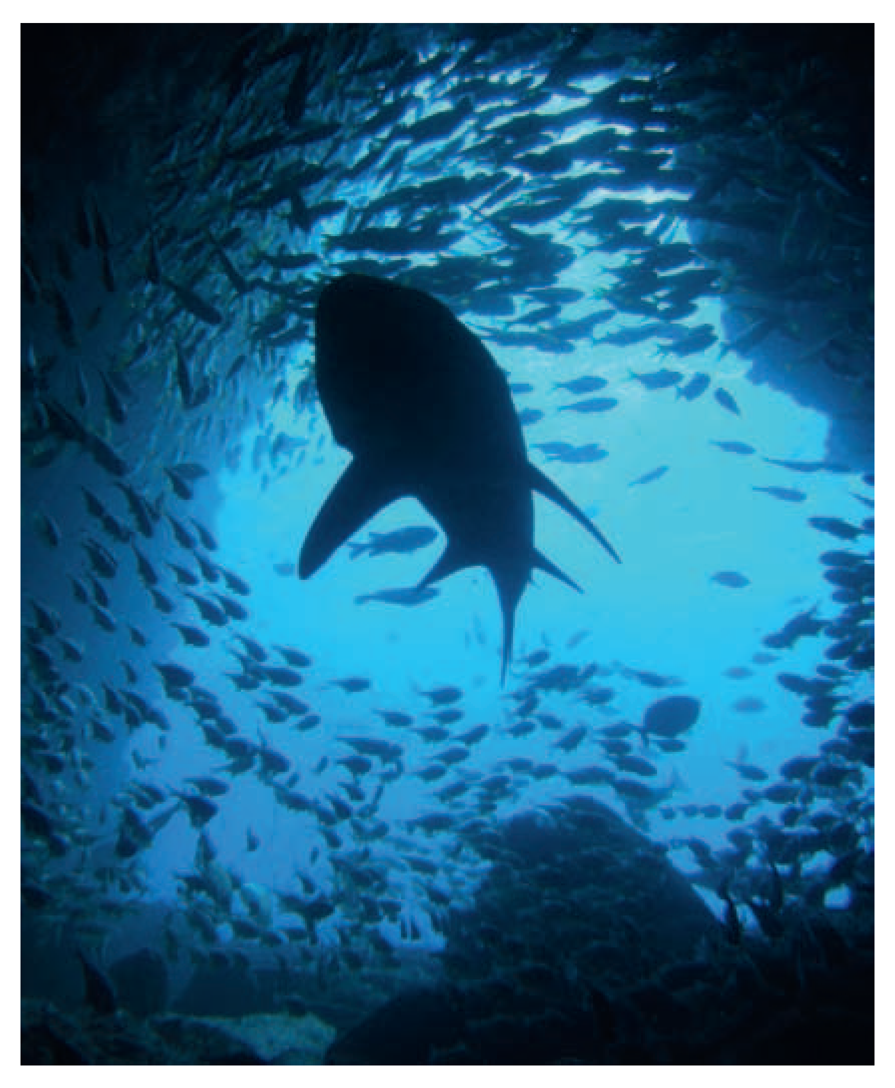
En nuestro grupo de investigación hemos analizado una red trófica del Caribe, que incluye 3313 interacciones tróficas entre 249 especies. El estudio, que se publicó en 2009 en la revista *Ecology Letters*, ha combinado herramientas computacionales usadas en el estudio de redes complejas con métodos estadísticos filogenéticos. A tenor de los resultados, la estructura compartimentada de la red trófica resulta de la heterogeneidad ambiental y de la selección de presas de distintos tamaños por parte de los grandes depredadores, lo que conlleva a una menor competencia entre estas especies. Es posible, por tanto, que una estructura compartimentada permita acomodar una mayor diversidad de especies, contribuyendo no solo a una mayor estabilidad de las redes tróficas en el tiempo, sino también a una mayor biodiversidad.

Asimismo, las investigaciones sugieren que, en el transcurso de la evolución de los ecosistemas marinos, han prevalecido características estructurales que contribuyen a la estabilidad y la resiliencia a las perturbaciones.

Si bien los resultados de nuestro estudio justifican un cierto optimismo, también han revelado el talón de Aquiles estructural de estos ecosistemas. En primer lugar, la estabilidad resulta en gran parte del tamaño de la red. Las cascadas tróficas tienden a ser pequeñas en ecosistemas diversos porque los depredadores pueden cambiar de recurso si disminuye la disponibilidad de las especies predominantes en su dieta. Conforme decrece la diversidad de un ecosistema, decae también la capacidad para amortiguar el efecto de una perturbación.

En segundo lugar, al acumular una gran fracción de las interacciones, un número reducido de especies destacan por encima de las demás como determinantes de las propiedades estructurales. Muchas de estas especies corresponden a depredadores de gran porte. Y lo preocupante es que, como consecuencia de la caza y el aumento de la sobrepesca durante las últimas décadas, la población de grandes depredadores (atunes, tiburones y numerosos mamíferos acuáticos) ha disminuido drásticamente. Si desaparecen estas especies, otros peces de menor tamaño ejercerán el papel de superdepredadores, con consecuencias hasta ahora imprevisibles para el ecosistema.

—*Enrico L. Rezende*
Universidad Autónoma de Barcelona
Eva M. Albert
Estación Biológica de Doñana
Sevilla
Miguel A. Fortuna
Universidad Princeton
Nueva Jersey, EE.UU.



En las cadenas tróficas cortas bastan pocos consumidores intermedios para que los nutrientes generados en la base de la cadena lleguen a superdepredadores como los tiburones.

MATEMÁTICAS

Agrimensura azteca

Se ha descodificado un complejo sistema de cálculo de áreas, basado en unidades fraccionarias, que usaban los acolhuas en el siglo XVI

En 1542 el virrey Antonio de Mendoza ordenó al Juez Pedro Vázquez de Vergara visitar Tepetlaoztoc (localizado en la cuenca de México y perteneciente a la cultura acolhua). El propósito era realizar un censo de la población y ajustar los tributos exigidos por su encomendero, Gonzalo de Salazar, tomando en consideración la cantidad y calidad de las tierras poseídas por los jefes de casa.

De esos censos y registros de tierras sobrevivieron el *Códice de Santa María Asunción* y el *Códice Vergara* (CV). Se cree que ambos códices corresponden a actualizaciones de documentos ya existentes, pues era la costumbre prehispánica mantener al día este tipo de datos administrativos.

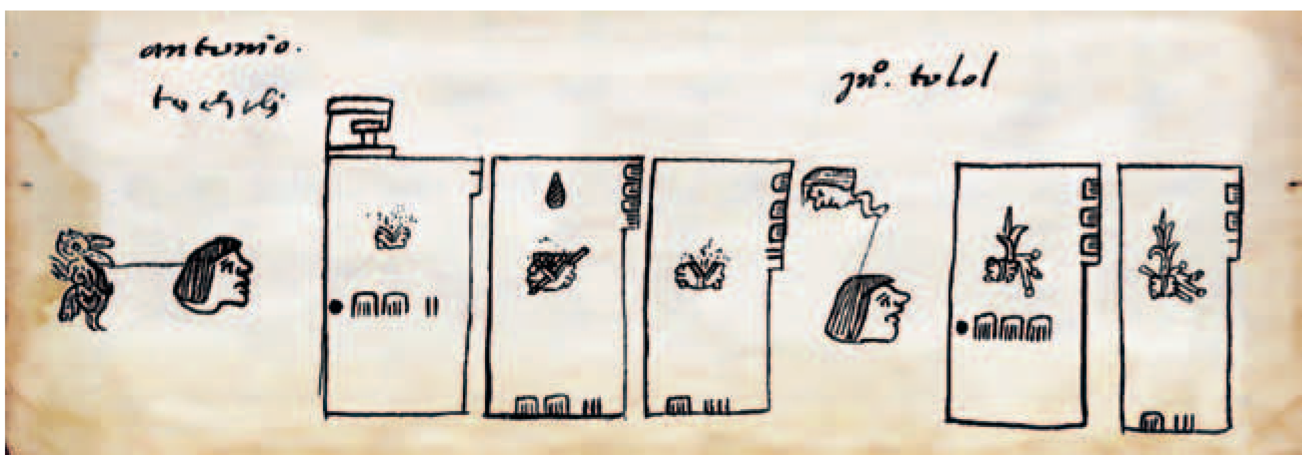
Dichos códices registran casas y terrenos de dos barrios colindantes de Tepetlaoztoc. Fueron firmados por el juez Vergara y formaban un solo documento en aquel entonces. Constan de tres secciones: Censo, *Milcocolli* y *Tlahuelmantli*. Los Censos detallan la composición de cada casa, el jefe de esta con su familia y demás dependientes.

En el *Milcocolli* se dibujan los terrenos de cada casa, con sus lados y longitudes. La unidad de longitud que utilizaron es el *tlalcuahuitl* («vara para medir tierras» en *náhuatl*), que llamaremos T; equivale a unos 2,5 metros. Como en el resto de Mesoamérica, los acolhuas utilizaron el sistema numérico de base 20 con una raya vertical para *uno*, cuatro rayas (cinco en algunos casos, según el pintor) unidas arriba por una horizontal para *cinco* y un punto para *veinte*. Aparte de puntos y rayas, se observan en algunos lados glifos de flechas, corazones y manos que indican medidas menores que T.

Desde el punto de vista matemático, el *Tlahuelmantli* es la sección más relevante de los códices. Dado que la notación aquí es diferente, no se entendió hasta 1980, cuando H. R. Harvey y Barbara J. Williams lograron descifrar que esta sección registraba las áreas de cada terreno.

Cada parcela del *Tlahuelmantli* se dibuja en forma de rectángulo, casi siempre con una pestaña en la esquina superior derecha. Para registrar las áreas, los puntos y rayas se dibujan solo en tres posicio-





MARÍA DEL CARMEN JORGE Y BARBARA WILLIAMS

Milcocolli* y *Tlahuelmantli **del jefe de la casa Antonio Tochtli y un dependiente, Juan Tolol, con sus glifos nominales a la izquierda. El *Milcocolli* (*arriba*) es la sección del códice que recoge los dibujos del perímetro de las casas. En cada lado se indica la longitud de ese tramo mediante puntos y rayas, y un conjunto de glifos compuesto por corazones (*verde*), manos (*rojo*) y flechas (*azul*). En el *Tlahuelmantli* (*abajo*) aparecen las áreas de los terrenos. Las parcelas se dibujan en forma de rectángulo con una pestaña en la esquina superior derecha, donde se indican las unidades en T^2. Las áreas se calculan multiplicando por 20 la cifra fuera de la pestaña y sumándole las unidades de esta. Así, de izquierda a derecha, el área del primer terreno se lee $32\ T \times 20\ T + 1\ T^2 = 641\ T^2$, la del segundo $13\ T \times 20\ T + 18\ T^2 = 278\ T^2$, y de forma análoga el resto.**

nes: en la pestaña superior, sobre el margen inferior y en el centro. Los números en la pestaña indican las unidades en *tlalcuahuitl* cuadrados (T^2). Sobre el margen inferior se escriben solo números del 1 al 19; en el centro, números mayores que 20. Las áreas se calculan multiplicando por 20 los números fuera de la pestaña y sumándoles las unidades de esta.

En un trabajo publicado en *Science* en 2008, acometimos el cálculo de las áreas del *Tlahuelmantli* utilizando únicamente los lados del *Milcocolli*. Hallamos cinco posibles reglas para el cálculo de las áreas de los cuadriláteros contenidos en el CV. Sin embargo, si utilizábamos solo números enteros, no lográbamos reproducir muchas de las áreas registradas. Descubrimos entonces que también los glifos de flechas, corazones y manos habían sido utilizados en los cálculos.

Esos glifos se consideran mónadas (del griego «unidad»). Se trata de unidades indivisibles que, cuando son distintas entre sí, no se multiplican ni suman. Los cálculos con mónadas mostraron las siguientes equivalencias respecto a la unidad de longitud T: 2 flechas equivalen a 1T; 5 corazones a 2T; 5 manos a 3T.

Por tanto, los valores métricos de los glifos acolhuas para unidades menores que T se determinan empíricamente como sigue: 1 flecha = 1,25 metros; 1 corazón = 1 metro; 1 mano = 1,5 metros. Curiosamente, los valores métricos tenochcas (habitantes de Tenochtitlan) para un corazón y una mano son distintos de los anteriores.

Los cálculos con mónadas son análogos a los utilizados para convertir horas en días, pulgadas en pies, etcétera. Para la aritmética con mónadas, usando las proporciones anteriores: 15 manos = 3 × × (5 manos) = 3 × (3T) = 9T; 9 flechas = = 4 × (2T) + (1 flecha) = 4T + (1 flecha), pero (1 flecha) se queda como residuo puesto que los registros de áreas del *Tlahuelmantli* son números enteros de T^2; al cuantificar áreas con mónadas, los residuos se redondean.

Con la aplicación de los algoritmos para el cálculo de áreas y el uso de mónadas, calculamos las áreas de 367 cuadriláteros del CV. Reprodujimos exactamente el área registrada en el códice en 287 de ellos. Estos resultados indican que los agrimensores acolhuas desarrollaron sus propios métodos para aproximar las áreas de sus terrenos e incorporaron el uso de «unidades fraccionarias», se supone, para lograr mayor precisión.

CÓDIGO ALCOHUA

Los agrimensores acolhuas desarrollaron un método para calcular con gran precisión las áreas de sus terrenos. Estas son las claves de su código y sistema de símbolos.

Sistema numérico en base 20

| = 1

(glifo) = 5

● = 20

Unidad de longitud: *tlalcuahuitl* (T)

1 T = 2,5 metros

Unidades fraccionarias (glifos)

(flecha) = (1/2)T = 1,25 metros

(corazón) = (2/5)T = 1 metro

(mano) = (3/5)T = 1,5 metros

—María del Carmen Jorge y Jorge
Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas
Universidad Nacional Autónoma de México
Barbara J. Williams (profesora emérita)
Depto. de geografía y geología
Universidad de Wisconsin-Rock County
Janesville WI

ASTROFÍSICA

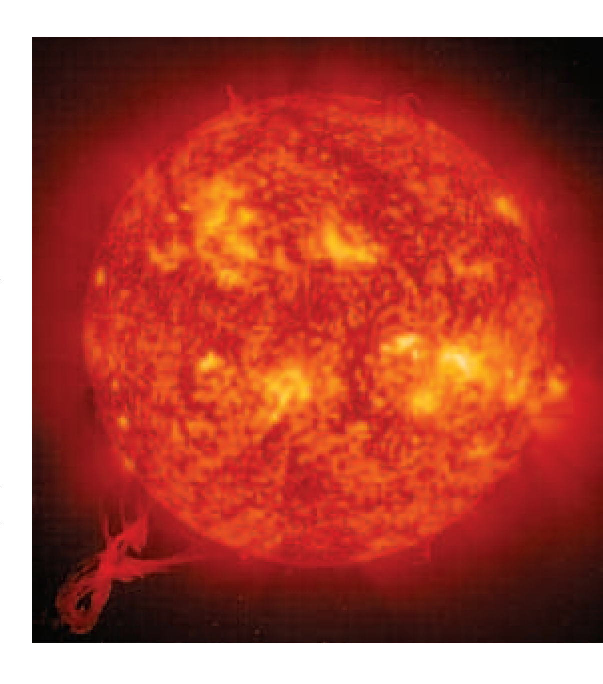
Sintiendo el calor

Eyecciones de plasma de corta duración podrían explicar por qué la atmósfera exterior del Sol se encuentra a una mayor temperatura que su superficie

Se trata de una pregunta que ha perseguido a los expertos desde los años cuarenta del siglo pasado: ¿por qué la capa exterior de la atmósfera del Sol se encuentra a mayor temperatura que la baja atmósfera y la superficie del astro? Se han sugerido varias explicaciones, desde ondas de sonido u ondas magnéticas que se disiparían en la alta atmósfera (corona), hasta pequeñas explosiones de energía (nanollamaradas), que nacen cuando las enmarañadas líneas de campo magnético en la corona se reconectan.

Sin embargo, estudios recientes efectuados gracias a una nueva generación de observatorios solares espaciales apuntan a un mecanismo diferente: las espículas, lenguas de plasma de corta duración que manan desde la cromosfera —la baja atmósfera—, parecen desempeñar un papel importante en el proceso que eleva la temperatura de la corona hasta temperaturas de millones de grados Kelvin. Estas espículas, cuyo origen reviste cierto misterio, apenas duran unos 100 segundos y emergen desde la cromosfera a velocidades de entre 50 y 100 kilómetros por segundo. El descubrimiento fue publicado por Bart De Pontieu, del Laboratorio Lockheed Martin de Astrofísica y Física Solar de Palo Alto, y sus colaboradores en la revista *Science*.

El grupo basó su estudio en los datos del Observatorio para la Dinámica Solar, lanzado por la NASA en 2010, y la misión espacial japonesa Hinode, que comenzó a operar en el 2006. Ambos pueden tomar imágenes cada pocos segundos, justo la clase de observaciones rápidas que se necesitan para identificar fenómenos transitorios o cambios vertiginosos. Los investigadores observaron que cuando las



CORTESÍA DE SOHO/EIT CONSORTIUM/ESA/NASA (Sol)

espículas, con temperaturas del orden de las decenas de miles de grados Kelvin, emergían de la cromosfera, las regiones inmediatamente superiores de la corona estallaban a temperaturas de entre uno y dos millones de grados.

Aún se desconoce qué impulsa el plasma cromosférico a semejantes velocidades y cuál es el mecanismo que lo calienta a temperaturas tan elevadas. Sin embargo, según Kenneth Philips, de la Escuela Universitaria de Londres, la correlación entre las espículas y el calentamiento coronal podría resultar la clave para resolver una cuestión que intriga a los astrónomos desde hace setenta años.

Por otro lado, James Klimchuk, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, sostiene que, si bien las espículas parecen cobrar cierta importancia en algunas regiones del astro, el tiempo dirá si inyectan una cantidad de plasma suficiente como para dar cuenta de las elevadas temperaturas de la corona. Basándose en sus propios cálculos, Klimchuk considera que las espículas aportan solo una pequeña fracción del plasma caliente presente en la corona, lo que aún dejaría un amplio margen para otros mecanismos de calentamiento de la corona más habituales.

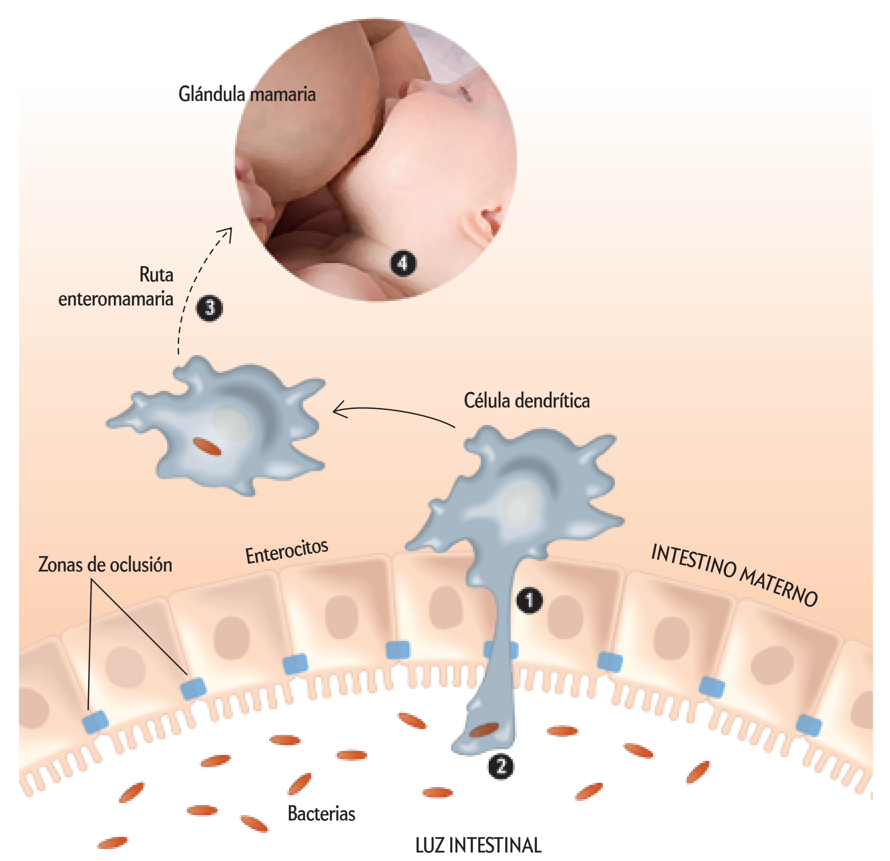
De Pontieu también se muestra cauto: «Considero importante destacar que no hemos solucionado el problema del calentamiento coronal. Aunque parece que hemos dado con una de las piezas del rompecabezas, aún falta por ver si se trata del proceso dominante o de una modesta contribución». *—John Matson*

BIOLOGÍA

Un alimento «vivo»

La leche materna contiene bacterias que, una vez en el intestino infantil, desempeñan funciones biológicas relevantes

La leche materna confiere al recién nacido una notable protección frente a enfermedades infecciosas gracias a la acción combinada de diversos componentes: inmunoglobulinas, células inmunocompetentes, ácidos grasos, oligosacáridos, péptidos, etcétera [*véase* «Así protege la leche materna de la madre al recién nacido», por Jack Newman; Investigación y Ciencia, febrero de 1996]. En fecha reciente se ha demostrado que este fluido biológico es, además, una fuente de bacterias comensales o probióticas para el intestino infantil. Se trata de un hallazgo relevante ya que tradicionalmente se había considerado que la leche materna era estéril. Entre las bacterias que se aíslan con mayor frecuencia de la leche humana destacan estafilococos, estreptococos, bifidobacterias y bacterias lácticas (como los lactobacilos).



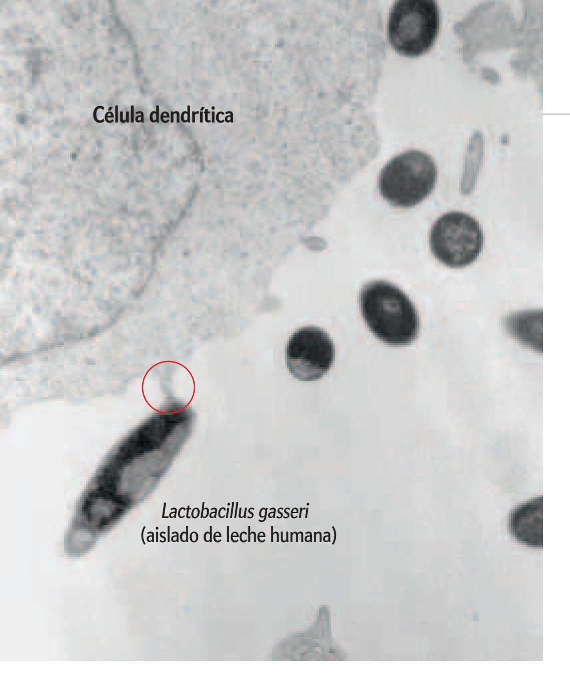
Migración bacteriana: Las bacterias presentes en el intestino de la madre se transfieren al intestino del lactante a través de una compleja ruta interna. Primero, las células dendríticas penetran el epitelio intestinal materno mediante la apertura de las zonas de oclusión entre enterocitos adyacentes (*1*). Luego, proyectan a la luz del intestino sus dendritas, que les permiten captar bacterias (*2*). Una vez unidas a las células dendríticas, las bacterias siguen una ruta enteromamaria que les lleva de la mucosa intestinal a la glándula mamaria (*3*). Por fin, transportadas por la leche materna, las bacterias llegarán al intestino del bebé.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Función bacteriana

La leche humana constituye un factor clave en la iniciación y el desarrollo de la microbiota intestinal del neonato, ya que garantiza un aporte constante de bacterias durante toda la lactancia.

En los últimos años, los problemas asociados a la difusión de bacterias resistentes a antibióticos han conducido a un renovado interés por la bacterioterapia, una práctica que hace uso de bacterias comensales o probióticas para prevenir o tratar la colonización del hospedador por parte de microorganismos patógenos.



Interacción específica (*marcada en rojo*) **entre las células dendríticas y las bacterias de la leche humana.**

Esta estrategia se basa en el principio de exclusión competitiva, por el que ciertas bacterias no patógenas se imponen sobre los patógenos cuando compiten por el mismo nicho ecológico.

La leche materna es el único alimento ingerido por un gran número de neonatos, una población muy sensible a las enfermedades infecciosas. En consecuencia, el aislamiento de bacterias con propiedades beneficiosas para la salud de los niños a partir de leche humana resulta particularmente atractivo ya que, por su propia naturaleza, cumplen algunos de los requisitos recomendados para bacterias empleadas a modo de probióticos humanos: origen humano, ingestión infantil prolongada sin efectos adversos y adaptación tanto a mucosas como a substratos lácteos. De hecho, los lactobacilos aislados de leche materna poseen un potencial probiótico similar o superior al de ciertas cepas de gran difusión comercial.

Otras bacterias de la leche también pueden resultar útiles para reducir la incidencia de patógenos en neonatos de alto riesgo expuestos a ambientes hospitalarios. Por ejemplo, algunos estafilococos y estreptococos no patógenos aislados de leche humana son capaces de impedir la colonización de los neonatos por parte de sus «congéneres» patógenos.

Asimismo, las bacterias de la leche materna podrían cumplir una función protectora frente a procesos alérgicos. La leche materna es la principal fuente de bacterias comensales para el intestino del lactante y se considera que las bacterias intestinales son uno de los estímulos más importantes para el desarrollo del tejido linfoide asociado a la mucosa intestinal, lo que conduce a una correcta maduración del sistema inmunitario infantil y, en consecuencia, promueve procesos antiinfecciosos y antialergénicos.



Por fin, la presencia de bacterias en la leche humana también podría explicar, al menos parcialmente, la abundancia de ciertas sustancias biológicamente activas en dicho fluido, ya que algunos de estos microorganismos tienen un gran potencial para sintetizar oligosacáridos, antioxidantes (glutatión), poliaminas y diversas vitaminas, entre otras moléculas.

Del intestino materno al infantil

La mayor parte de las bacterias existentes en la leche materna proceden de la microbiota intestinal de la madre y acceden al epitelio de la glándula mamaria a través de una ruta interna. Para ello, las células dendríticas (células del sistema inmunitario) existentes en el intestino humano son capaces de abrirse camino entre las células epiteliales, proyectar ramificaciones al interior del tubo y captar células viables, preservando la integridad de la barrera intestinal. Una vez unidas a las células dendríticas, las bacterias pueden propagarse a epitelios distantes, como el mamario. Y, por fin, a través de la leche materna, los microorganismos llegan al intestino del bebé.

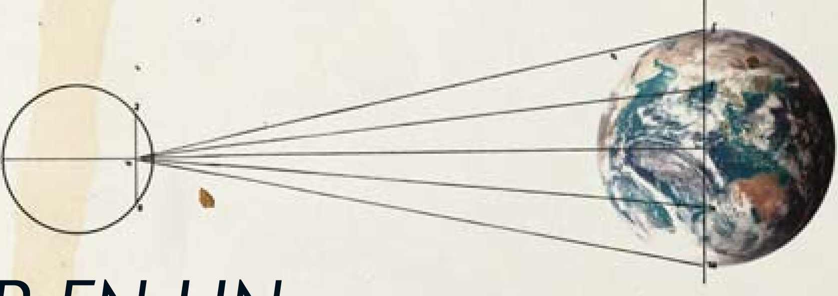
Precisamente durante los últimos meses de gestación y toda la lactancia se establece la ruta enteromamaria, una conexión entre la mucosa intestinal y la glándula mamaria responsable de la acumulación selectiva de células inmunitarias en la leche. Además de la capacidad de translocación, las bacterias del intestino materno reúnen otras dos propiedades que les permiten alcanzar el epitelio de la glándula mamaria y, posteriormente, el intestino del niño: capacidad para sobrevivir durante el tránsito por la circulación sistémica y capacidad para sobrevivir durante el tránsito por el aparato digestivo del lactante.

En consecuencia, podemos hablar de la existencia de una microbiota mamaria «temporal», cuya formación se inicia durante el último tercio del embarazo y que desaparece tras el destete. Ello sugiere que la modulación de la microbiota intestinal de la madre durante el embarazo y la lactancia puede tener un efecto directo en la salud de los lactantes.

—Juan Miguel Rodríguez Gómez
Depto. de nutrición, bromatología y tecnología de los alimentos
Universidad Complutense de Madrid



Vlatko Vedral ganó su fama al desarrollar un novedoso método para cuantificar el entrelazamiento y aplicarlo a sistemas macroscópicos. Actualmente trabaja en la Universidad de Oxford y en la Universidad Nacional de Singapur.



FÍSICA

VIVIR EN UN MUNDO CUÁNTICO

La mecánica cuántica no solo describe el comportamiento del mundo microscópico. Su influencia llega a todas las escalas: pájaros, plantas y, quizás, el ser humano

Vlatko Vedral

Los libros de texto suelen presentar la mecánica cuántica como la teoría del mundo microscópico. Esta explica el comportamiento de las partículas, los átomos y las moléculas, pero deja paso a la física clásica cuando llegamos a la escala de las frutas, las personas o los planetas. En algún punto entre las moléculas y la fruta se hallaría la frontera donde cesa el comportamiento cuántico y comienza la familiaridad de lo clásico. La impresión de que la mecánica cuántica se limita al mundo microscópico se extiende incluso al ámbito científico. Brian Greene, de la Universidad de Columbia, escribe en la primera página de su renombrado —y, por lo demás, excelente— libro *El universo elegante* que la mecánica cuántica «proporciona una herramienta teórica para entender el universo a las escalas más diminutas». La física clásica, que comprende cualquier teoría que no sea cuántica, incluida la relatividad de Einstein, se ocupa de las escalas mayores.

Pero esa división es un mito. A día de hoy, muy pocos otorgan a la física clásica un rango equiparable al de la mecánica cuántica; en realidad, aquella no representa más que una aproximación útil a un mundo que se rige por leyes cuánticas a todas las escalas. Puede que los efectos cuánticos resulten difíciles de observar en el mundo macroscópico, pero la razón no tiene que ver con el tamaño en sí, sino con la manera en que los sistemas cuánticos interaccionan unos con otros. Hasta el pasado dece-

EN SÍNTESIS

La mecánica cuántica ha sido considerada tradicionalmente la teoría del mundo microscópico: la física de las moléculas, los átomos y las partículas subatómicas.

No obstante, se cree que su aplicabilidad es universal. La razón por la que sus extrañas propiedades se desvanecen en sistemas de gran tamaño no obedecería a una simple cuestión de escala.

Durante los últimos años, los experimentos han demostrado la aparición de efectos cuánticos en un número cada vez mayor de sistemas macroscópicos.

El efecto cuántico por antonomasia, el entrelazamiento, puede tener lugar tanto a temperaturas elevadas como en sistemas de gran tamaño, incluidos los seres vivos.

JUSTIN VAN GENDEREN



nio no se había confirmado de manera experimental la persistencia del comportamiento cuántico a escalas macroscópicas, pero hoy se hace de manera rutinaria. Tales efectos son mucho más penetrantes de lo que nunca nadie antes había sospechado. Podrían afectar incluso a las células de nuestro cuerpo.

Incluso a quienes nos dedicamos a estudiar tales fenómenos nos cuesta asimilar lo que estos nos enseñan sobre la naturaleza. El comportamiento cuántico elude la visualización y el sentido común; nos fuerza a reconsiderar nuestra concepción del universo y a aceptar una imagen insólita de nuestro mundo.

FÍSICA DEMENTE

Para un físico cuántico, las leyes clásicas describen una versión en blanco y negro de un mundo que en realidad brilla en tecnicolor: las categorías clásicas fallan a la hora de capturar todos sus matices. En los libros de texto tradicionales, las ricas tonalidades de lo cuántico se van difuminando a medida que aumenta el tamaño del sistema. Una a una, las partículas son cuánticas; en conjunto, se tornan clásicas.

El primer indicio de que el tamaño no supone el factor determinante se remonta a uno de los experimentos mentales más famosos de la historia: el del gato de Schrödinger. El físico austriaco propuso su macabra paradoja para ilustrar la imposibilidad de trazar fronteras entre los mundos microscópico y macroscópico. Según la mecánica cuántica, un átomo radiactivo puede haberse desintegrado y, al mismo tiempo, no haberlo hecho. Si el átomo se conecta a una ampolla de veneno de tal manera que, en caso de desintegrarse, el veneno se libera y mata al gato, el animal pasa a formar parte del mismo limbo cuántico en el que se encuentra el átomo. La rareza de uno contagia al otro. La verdadera pregunta es por qué los amos solo ven a sus mascotas vivas o muertas.

El punto de vista moderno sostiene que el mundo adopta una apariencia clásica como consecuencia de las complejas interacciones entre un objeto y su entorno, las cuales conspiran para esconder los efectos cuánticos. La información sobre el estado de salud del gato se filtra con rapidez al entorno en forma de fotones e intercambio de calor. Un estado cuántico puede describirse como una combinación de varios estados clásicos (por ejemplo, «vivo *y* muerto»), pero dichas combinaciones tienden a disiparse. La información que acaba llegándonos se expresa en condiciones clásicas bien definidas, como «vivo» *o* «muerto».

UNA PARADOJA CUÁNTICA

Observar al observador

La idea de que la mecánica cuántica se aplica a todos los objetos, humanos incluidos, implica extrañas conclusiones. Consideremos esta variante del famoso experimento del gato de Schrödinger que Eugene P. Wigner propuso en 1961 y que David Deutsch, de la Universidad de Oxford, desarrolló en 1986.

Supongamos que una física experimental muy cualificada, Alicia, encierra a su amigo Benito en un cuarto junto a un gato, un átomo radiactivo y una ampolla con veneno para gatos. Tal y como ocurría en el experimento original, el veneno se libera cuando el átomo se desintegra. La diferencia crucial reside en que ahora hay un humano con quien nos podemos comunicar.

Desde el punto de vista de Alicia, el átomo se halla en una superposición de estados, desintegrado y no desintegrado al mismo tiempo, por lo que también el gato se encuentra vivo y muerto a la vez. Benito, sin embargo, puede observar al gato y lo ve en un estado o en otro. Alicia pasa un papel por debajo de la puerta en el que pregunta a Benito si el gato se halla en un estado definido. Benito responde «Sí».

Obsérvese que Alicia no ha preguntado si el gato estaba vivo o muerto, pues ello hubiera forzado un resultado —o, como se dice en términos técnicos, Alicia hubiera *colapsado* el estado—. A ella le basta con saber que Benito ve el gato vivo o muerto, pero no le pregunta cómo lo ve.

Pero, dado que Alicia ha evitado colapsar el estado, la teoría cuántica nos dice que pasar el papel por debajo de la puerta es un proceso reversible. En principio, Alicia podría desandar todos los pasos que ha dado. Y si para Benito el gato había muerto, ahora podría estar vivo, el veneno se hallaría en la botella, la partícula no se habría desintegrado y Benito no recordaría haber visto ningún gato muerto.

Pero queda una traza: la hoja de papel. Alicia tiene la posibilidad de deshacer la observación de tal manera que el papel quede intacto. Y en la nota queda escrita la palabra «Sí», que demuestra que Benito había visto el gato vivo o muerto.

Lo anterior conduce a una conclusión extraordinaria. Alicia fue capaz de dar la vuelta a la observación porque, por su parte, evitó colapsar el estado: para ella, Benito se hallaba en un estado tan indeterminado como el gato. Pero Benito creyó que el estado había colapsado, pues él sí vio un resultado bien definido. El papel es la prueba de ello. El experimento demuestra dos principios aparentemente contradictorios. Alicia piensa que la mecánica cuántica se aplica a los objetos macroscópicos, pues no solo el gato, sino también Benito puede hallarse en un limbo cuántico. Benito, por su parte, cree que los gatos solo pueden estar vivos o muertos.

Aunque llevar a cabo semejante experimento con un humano revestiría una complejidad enorme, se ha conseguido prácticamente lo mismo con sistemas más simples. Anton Zeilinger, de la Universidad de Viena, y sus colaboradores experimentan con fotones a los que envían contra un espejo semitransparente. Si el fotón es reflejado, el espejo retrocede; si lo atraviesa, el espejo permanece inmóvil. Aquí el fotón desempeña la función del átomo que se desintegra, pues puede hallarse en una superposición de estados. El espejo, con sus miles de millones de átomos, funciona como el gato y como Benito. Que el espejo retroceda o quede en reposo resulta análogo a que el gato muera o no y que Benito vea si muere o vive. En este caso, el proceso puede revertirse al volver a reflejar el fotón hacia el espejo. A escalas menores, los equipos liderados por Rainer Blatt, de la Universidad de Innsbruck, y por David J. Wineland, del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Boulder, han logrado deshacer las medidas sobre iones en vibración en una trampa.

Al desarrollar su astuto experimento mental, Wigner y Deutsch siguieron los pasos de Erwin Schrödinger, Albert Einstein y otros que pensaban que aún era necesario hurgar en las profundidades de la mecánica cuántica. Durante décadas, los expertos rara vez se han preocupado de hacerlo, ya que los fundamentos de la teoría no afectaban a las aplicaciones prácticas. Pero, ahora que podemos realizar estos experimentos, entender los principios de la mecánica cuántica ha pasado a un primer plano.

Esa filtración de la información constituye la base de un proceso conocido como *decoherencia* [*véase* «Cien años de misterios cuánticos», por Max Tegmark y John Archibald Wheeler; Investigación y Ciencia, abril de 2001].

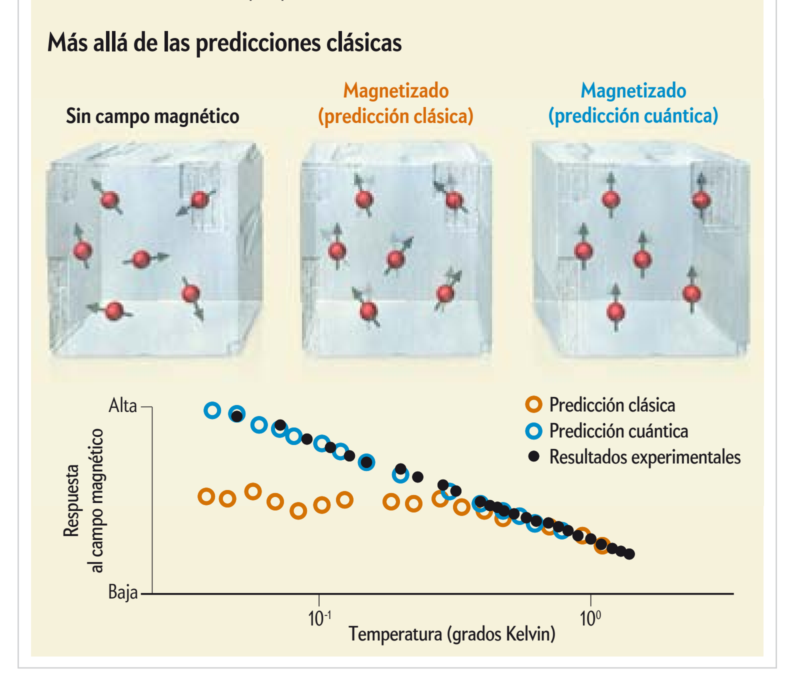
La sensibilidad de un objeto a la decoherencia aumenta con su tamaño, lo que justifica por qué la mayoría de las veces funciona considerar la mecánica cuántica como la teoría de lo microscópico. Pero existen gran cantidad de situaciones en las que la filtración de la información puede ralentizarse o incluso frenarse por completo; es entonces cuando el mundo cuántico se exhibe en toda su gloria. El fenómeno cuántico por antonomasia es el entrelazamiento, término acuñado por Schrödinger en el mismo artículo de 1935 en el que presentó su gato al mundo. El entrelazamiento une las partículas en un todo indivisible. Un sistema clásico siempre puede separarse en partes; al menos en principio, todas sus propiedades colectivas surgen a partir de las de sus constituyentes. Pero no así un sistema entrelazado, lo que implica consecuencias bastante extrañas. Incluso cuando las partículas entrelazadas se encuentran separadas una gran distancia, se comportan como una sola entidad, fenómeno que Einstein bautizó como su famosa «espeluznante acción a distancia».

La mayor parte de las veces se considera el entrelazamiento entre dos partículas elementales; electrones, por ejemplo. De manera algo rudimentaria, podemos imaginar estas partículas como pequeñas peonzas que rotan en uno u otro sentido en torno a un eje que puede adoptar cualquier orientación: horizontal, vertical, a 45 grados, etcétera. Para medir la rotación (espín) de la partícula, escogemos un eje y comprobamos si el electrón rota o no alrededor de dicho eje.

ENTRELAZAMIENTO MACROSCÓPICO

Sal cuántica

Durante años se ha pensado que los fenómenos cuánticos aparecían solo en átomos o partículas subatómicas; los sistemas formados por un gran número de partículas se comportarían de manera clásica. En un cristal de sal, los átomos suelen apuntar en direcciones aleatorias (*izquierda*). Estos se alinean al aplicar un campo magnético, pero lo hacen con mayor rapidez que la predicha por la física clásica (*centro*). Es el entrelazamiento cuántico (la «espeluznante acción a distancia» que coordina el comportamiento de las partículas) lo que les permite alinearse con gran rapidez (*derecha*). El fenómeno se revela al medir las propiedades magnéticas del cristal (*gráfica*).



Supongamos que las partículas se comportasen de manera clásica. Podríamos poner un electrón a girar en torno al eje horizontal en el sentido de las agujas del reloj y el otro alrededor del mismo eje, pero en sentido contrario. Decimos entonces que el espín total es cero. Sus ejes de rotación permanecen fijos y, si decidimos medir el espín, el resultado dependerá de si el eje que escojamos para realizar la medición se encuentra alineado o no con el eje de rotación de las partículas. Si medimos el espín en la dirección horizontal, veremos que ambas partículas giran en sentidos opuestos; si lo hacemos en la dirección vertical, no observaremos rotación alguna.

Para los electrones cuánticos, la situación cambia por completo. Resulta posible preparar el sistema de tal modo que el espín total sea nulo, pero sin necesidad de especificar el espín de cada partícula. Si medimos entonces el espín de una de ellas, la veremos girar en sentido horario o antihorario. Pero el resultado es aleatorio, como si la partícula decidiera por sí sola en qué sentido rotar. Sin embargo, sea cual sea la dirección que escojamos para medir los espines —y siempre y cuando esta sea la misma para los dos—, veremos que ambos electrones rotan siempre en sentidos opuestos. Sigue siendo un misterio cómo cada uno de ellos sabe que tiene que girar en sentido opuesto al del otro. Es más: si se mide el espín de un electrón en la dirección horizontal y el del otro en la vertical, aún detectaremos un espín para cada uno. Da la sensación de que las partículas no poseen un eje de rotación definido. Todos estos resultados nos llevan a un punto que la física clásica no logra explicar.

TODOS A UNA

La mayor parte de las demostraciones de entrelazamiento no involucran más que a unas pocas partículas. Cuanto mayor es su número, más difícil resulta aislar el sistema y con mayor facilidad se entrelazan sus partículas con las del entorno, lo que oscurece las interconexiones originales entre las partículas. En términos de decoherencia, se filtra demasiada información al entorno, lo que provoca que el sistema acabe comportándose de manera clásica. La dificultad de preservar el entrelazamiento plantea un reto de enormes proporciones a la hora de emplearlo con fines prácticos, como en el campo de la computación cuántica.

Un experimento realizado en 2003 demostró que, si se mantiene bajo control la filtración de información al entorno, es posible conservar el entrelazamiento en sistemas de gran tamaño. Gabriel Aeppli, del Colegio Universitario de Londres, y sus colaboradores dispusieron una muestra de sal de fluoruro de litio en un campo magnético. Bajo tales condiciones, los átomos de la sal se comportan como pequeños imanes giratorios que tratan de alinearse con el campo magnético externo, una respuesta conocida como susceptibilidad magnética. Las fuerzas que unos átomos ejercen sobre otros actúan como una especie de «presión social» que lleva al conjunto a alinearse con mayor rapidez.

GEORGE RETSECK (*ilustración*), JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*), FUENTE: «ENTANGLED QUANTUM STATE OF MAGNETIC DIPOLES», POR S. GHOSH ET AL., EN *NATURE*, VOL. 425, 4 DE SEPTIEMBRE DE 2003

Sin embargo, al medir el tiempo que los átomos tardaban en alinearse en función de la intensidad del campo, el equipo de Aeppli observó que los átomos respondían mucho más rápido de lo que cabía esperar a partir de sus interacciones mutuas. Algún efecto adicional aceleraba el alineamiento colectivo. Los investigadores achacaron la respuesta al entrelazamiento. De ser cierto, habrían logrado entrelazar los 10^{20} átomos de la muestra.

Para evitar la distorsión que la energía térmica hubiera podido introducir en la medida, el equipo de Aeppli realizó el experimento a muy bajas temperaturas, del orden del milikelvin. Desde entonces, Alexandre Martins de Souza, del Centro Brasileño para la Investigación Física de Río de Janeiro, y su equipo han logrado entrelazamientos macroscópicos en materiales como el carboxilato de cobre a temperatura ambiente e incluso superior. En estos sistemas, la interacción entre los espines de las partículas resulta lo bastante intensa como para resistir el caos térmico. En otros casos se aplica una fuerza externa para neutralizar los efectos térmicos. En los últimos años el entrelazamiento ha sido observado en sistemas de tamaños y temperaturas cada vez mayores, desde iones atrapados en campos electromagnéticos hasta átomos ultrafríos distribuidos en redes cristalinas o qubits en superconductores.

Tales sistemas son análogos al gato de Schrödinger. Consideremos un átomo. Sus electrones pueden encontrarse cerca del núcleo, lejos de él, o ambas cosas al mismo tiempo. El electrón se comporta como el átomo radiactivo —que ha podido desintegrarse o no— del experimento mental de Schrödinger. Por otra parte, con independencia de lo que haga el electrón, el átomo puede estar desplazándose hacia la izquierda o hacia la derecha. Ese movimiento desempeña la función del gato vivo o muerto. Mediante un láser para manipular el átomo, es posible acoplar ambas propiedades: si el electrón se halla cerca del núcleo, podemos hacer que el átomo se mueva hacia la izquierda; si el electrón se aleja, el átomo se desplaza hacia la derecha. Ello entrelaza el estado del electrón con el movimiento del átomo, al igual que la desintegración radiactiva se hallaba entrelazada con el estado del gato. No hemos hecho más que sustituir al felino vivo o muerto por un átomo que se mueve a izquierda o derecha.

Otros experimentos han implementado la misma idea básica a escalas cada vez mayores. Se ha logrado entrelazar un número enorme de átomos y llevarlos a estados del todo imposibles para la física clásica. Y si los sólidos a escala macroscópica y a temperatura ambiente pueden experimentar el entrelazamiento, no nos encontramos sino a un paso de preguntarnos si podemos hacer lo mismo con una clase muy particular de sistemas calientes y de gran tamaño: los seres vivos.

LOS PÁJAROS DE SCHRÖDINGER

El petirrojo europeo es un pequeño pájaro que cada invierno migra de Escandinavia a las cálidas planicies del África ecuatorial. Los petirrojos realizan este viaje de ida y vuelta de unos 13.000 kilómetros con tanta facilidad que, durante años, los expertos se han preguntado si estos animales poseen algún tipo de brújula.

Durante los años setenta, Wolfgang y Roswitha Wiltschko, de la Universidad de Frankfurt, colocaron petirrojos que habían migrado a África en un campo magnético artificial. Descubrieron que los pájaros no notaban en absoluto una inversión del campo magnético, lo que indicaba que no podían distinguir entre norte y sur. Sin embargo, sí respondían a la inclinación del campo magnético de la Tierra (el ángulo que subtienden las líneas de campo con la superficie). Eso era todo lo que necesitaban para orientarse. Por otra parte, los petirrojos a los que tapaban los ojos no distinguían ningún campo magnético, lo que demostraba que, de alguna manera, los animales percibían el campo magnético con los ojos.

EXPERIMENTOS

El tamaño no importa

Los efectos cuánticos no se limitan a las partículas subatómicas. Aparecen también en experimentos con sistemas mayores y a temperaturas elevadas.

RESULTADO	AÑO	TEMPERATURA	EQUIPO
Observación de patrones de interferencia en moléculas de fullereno. Las moléculas, al igual que las partículas, se comportan como ondas.	1999	900–1000 K (kelvin)	Markus Arndt, Anton Zeilinger et al. (Universidad de Viena)
Deducción del entrelazamiento entre billones de átomos a partir de la susceptibilidad magnética de carboxilatos metálicos.	2009	630 K	Alexandre Martins de Souza et al. (Centro Brasileño para la Investigación Física)
Demostración de que los efectos cuánticos aumentan la eficiencia de la fotosíntesis en dos especies de algas marinas.	2010	294 K	Elisabetta Collini et al. (universidades de Toronto, Nueva Gales del Sur y Padua)
Récord de observación de fenómenos cuánticos en moléculas gigantes, incluida una de 430 átomos.	2011	240–280 K	Stefan Gerlich, Sandra Eibenberger et al. (Universidad de Viena)
Entrelazamiento de tres qubits en un circuito superconductor. El procedimiento permite crear sistemas cuánticos de cualquier tamaño.	2010	0,1 K	Leonardo DiCarlo, Robert J. Schoelkopf et al. (Universidad de Yale y Universidad de Waterloo)
Superposición de dos estados cuánticos en un resonador mecánico de unos 30 micrómetros (visible al ojo desnudo).	2010	25 mK (milikelvin)	Aaron O'Connell, Max Hofheinz et al. (Universidad de California en Santa Bárbara)
Entrelazamiento en cadenas de ocho iones de calcio atrapadas en una trampa para iones. Hoy se logran manejar hasta catorce.	2005	0,1 mK	Hartmut Häffner, Rainer Blatt et al. (Universidad de Innsbruck)
Entrelazamiento entre los modos de vibración (en lugar de propiedades internas, como el espín) de iones de berilio y magnesio.	2009	0,1 mK	John D. Jost, David J. Wineland et al. (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU.)

GEORGE RETSECK

En el año 2000, Thorsten Ritz, por entonces en la Universidad de Florida del Sur, y sus colaboradores propusieron que la clave residía en el entrelazamiento. Según su propuesta, basada en un trabajo previo de Klaus Schulten, de la Universidad de Illinois, en el ojo de las aves existe cierto tipo de molécula con dos electrones que forman un par entrelazado con espín total cero. Se trata de una situación irreproducible por medio de leyes clásicas. Cuando la molécula absorbe la luz visible, los electrones adquieren la energía necesaria para separarse, lo que los hace sensibles al campo magnético terrestre. Si el campo magnético se inclina, afecta de manera diferente a cada electrón e induce un desequilibrio que modifica la reacción química que experimenta la molécula. Esa diferencia se traduce en impulsos neurales que, a la postre, crean una imagen del campo magnético en el cerebro del pájaro.

Aunque las pruebas del mecanismo de Ritz son indirectas, Christopher T. Rogers y Kiminori Maeda, de la Universidad de Oxford, han estudiado en el laboratorio —en lugar de en animales vivos— moléculas similares a las de Ritz y han demostrado que son, de hecho, sensibles a los campos magnéticos como consecuencia del entrelazamiento entre electrones. De acuerdo con los cálculos que mis colaboradores y yo hemos realizado, los efectos cuánticos persisten en el ojo del pájaro durante unos 100 microsegundos, lo que en este contexto supone un tiempo bastante largo: el récord para un sistema de espines de electrones creado en un laboratorio ronda los 50 microsegundos. Aún desconocemos cómo un sistema natural preserva los efectos cuánticos durante tanto tiempo, pero la respuesta quizá nos ayude a controlar la decoherencia en los ordenadores cuánticos.

Otro proceso biológico que quizá guarde relación con el entrelazamiento es la fotosíntesis. La luz que incide sobre la planta excita los electrones de las moléculas de clorofila. Ello pone en marcha una cadena de transporte en la que los electrones han de encontrar su camino hacia un mismo lugar: el centro químico donde depositan su energía y desencadenan las reacciones que nutren las células de la planta. La física clásica no logra explicar la elevada eficiencia con la que el proceso tiene lugar.

Los experimentos realizados por varios grupos, como el de Graham R. Fleming y Mohan Sarovar, de la Universidad de California en Berkeley, y Gregory D. Scholes, de la Universidad de Toronto, han sugerido que la eficiencia del proceso se debe a la mecánica cuántica. Según esta, una partícula no sigue un único camino, sino que procede por varios a la vez. Los campos electromagnéticos en el interior de las células vegetales provocarían que algunos de estos caminos se cancelasen, al tiempo que otros se verían reforzados. Como resultado, se reduciría la probabilidad de que los electrones diesen rodeos innecesarios y aumentaría la de que llegasen directos a su destino.

El entrelazamiento duraría solo una fracción de segundo y afectaría a no más de 100.000 átomos. ¿Existe en la naturaleza algún ejemplo de entrelazamientos mayores y más persistentes? No lo sabemos. Pero la pregunta resulta lo bastante atractiva como para estimular el nacimiento de una nueva disciplina: la biología cuántica.

¿QUÉ SIGNIFICA TODO ESTO?

Para Schrödinger carecía de sentido que un gato pudiera estar vivo y muerto a la vez: cualquier teoría que hiciera predicciones semejantes debía ser incorrecta. Varias generaciones de físicos han compartido su incomodidad y han participado de la idea de que la mecánica cuántica no puede aplicarse a escalas mayores. En los años ochenta, Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, sugirió que la gravedad podría ser la responsable de que la mecánica cuántica dejara paso a las leyes clásicas para objetos de masa superior a los 20 microgramos. Por su parte, Gian Carlo Ghirardi y Tomaso Weber, de la Universidad de Trieste, y Alberto Rimini, de la Universidad de Pavía, propusieron que un conjunto de partículas lo bastante numeroso comenzaba espontáneamente a comportarse de manera clásica.

Pero los experimentos recientes dejan muy poco margen a tales límites. La división entre los mundos clásico y cuántico no parece fundamental, sino solo una cuestión de ingenuidad experimental. Hoy en día, pocos físicos piensan que la física clásica constituya una teoría correcta a ninguna escala. El hecho de que la mecánica cuántica se aplique a todos los tamaños nos obliga a enfrentarnos a los misterios más profundos de la teoría. No podemos relegarlos a meros detalles que afectan solo a las escalas más pequeñas.

El espacio y el tiempo, dos conceptos fundamentales en física clásica, resultan secundarios en mecánica cuántica. Lo principal son los entrelazamientos, los cuales interconectan sistemas cuánticos sin referencia alguna al espacio o al tiempo. Si existiese una línea que separase los mundos clásico y cuántico, podríamos utilizar el espacio y el tiempo de la física clásica como herramientas para describir los procesos cuánticos. Pero, sin tal línea divisoria —y, de hecho, en ausencia de un mundo verdaderamente clásico—, ese enfoque se antoja imposible. Debemos explicar el espacio y el tiempo como entidades emergentes a partir de una física fundamental que carece de ellos.

Esa idea también podría ayudarnos a reconciliar la mecánica cuántica con el otro gran pilar de la física, la relatividad general de Einstein. Esta teoría, que describe la gravedad en términos de la geometría del espaciotiempo, supone que los objetos poseen posiciones bien definidas y que nunca se encuentran en más de un sitio al mismo tiempo, en contradicción directa con la mecánica cuántica. Muchos físicos, como Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, piensan que la teoría de la relatividad debe dejar paso a otra en la que el espacio y el tiempo no existan. El espaciotiempo clásico surgiría a partir de entrelazamientos cuánticos mediante un proceso de decoherencia.

Una posibilidad aún más interesante consiste en que la gravedad no constituya una interacción de pleno derecho, sino el «ruido» generado por la actividad cuántica de las otras fuerzas fundamentales. Esta idea de una *gravedad inducida* se remonta al físico nuclear Andréi Sájarov, quien la propuso en los años sesenta. De ser así, no solo habríamos de retirar a la gravedad la categoría de interacción fundamental, sino que los esfuerzos por cuantizar la gravedad carecerían de todo sentido. La gravedad podría incluso no existir a nivel cuántico.

Las implicaciones de que objetos macroscópicos como nosotros mismos vivamos en un limbo cuántico se antoja tan perturbadora e inquietante que los físicos nos hallamos en un estado entrelazado de asombro y confusión.

PARA SABER MÁS

Entangled quantum state of magnetic dipoles. S. Ghosh et al. en *Nature*, vol. 425, págs. 48-51, 4 de septiembre de 2003. Disponible en **arxiv.org/abs/cond-mat/0402456**

Entanglement in many-body systems. Luigi Amico, Rosario Fazio, Andreas Osterloh y Vlatko Vedral en *Reviews of Modern Physics*, vol. 80, n.º 2, págs. 517-576, 6 de mayo de 2008. Disponible en **arxiv.org/abs/quant-ph/0703044**

Decoding reality: The universe as quantum information. Vlatko Vedral. Oxford University Press, 2010.

SALUD

El cáncer del diablo

Un tumor contagioso amenaza la supervivencia del diablo de Tasmania. ¿Podría aparecer también en humanos un cáncer transmisible?

Menna E. Jones y Hamish McCallum





Amenazados. Los diablos representan un enemigo temible para muchos animales, pero el cáncer puede terminar con esta especie singular.

Menna E. Jones es investigadora del Consejo Australiano de Investigación en la Universidad de Tasmania. Sus estudios sobre los diablos de Tasmania, el tumor facial y los efectos de la pérdida de este depredador culminal en la biodiversidad sirven de base a los programas de gestión de la conservación.



Hamish McCallum, dedicado durante años a la ecología animal, es director de la facultad de medioambiente en la Universidad de Griffith, en Queensland. Antes de incorporarse a este centro, fue investigador principal del programa Salvemos al Diablo de Tasmania.



Por las mordeduras amorosas que presenta en el cuello, deduzco que la joven hembra de diablo de Tasmania ha tenido hace poco un encuentro sexual. Las señales anuncian también algo siniestro: quizás el animal perezca antes de terminar de criar a su primera camada.

Estoy sentada en el suelo, mientras sostengo un ejemplar que he atrapado en el Parque Nacional Freycinet, en la costa oriental de la isla de Tasmania, una joya de la naturaleza en el sur de Australia. Allí conocí, en 2001, una enfermedad terrible que provoca tumores de gran tamaño y ulcerados en la cara de estos marsupiales (*Sarcophilus harrisii*); las excrecencias les dificultan la alimentación y suelen terminar con su vida a los seis meses de la infección. Hoy en día, la población de Freycinet casi ha desaparecido, lo mismo que sucede en la mayor parte del área de distribución de la especie. Detectado por primera vez en 1996, en el extremo nororiental de la isla, el cáncer ha reducido hasta un 95 por ciento las poblaciones de diablos en Tasmania. La enfermedad está abocando a la extinción a la especie, que habita únicamente en esta isla. Por suerte, la mayoría de tipos de cáncer no son contagiosos: en el autobús, podemos sentarnos junto a alguien sin miedo de contraer un tumor. Hay algunos tumores malignos que sí proceden de bacterias o virus. El virus del papiloma humano, por ejemplo, puede causar cáncer de cuello del útero. Pero lo hace al predisponer a las células de las mujeres infectadas a adquirir la enfermedad, no por la transmisión directa de células tumorales de una persona a otra. En el caso de la enfermedad de los diablos, las propias células cancerosas constituyen el agente infeccioso.

La rápida devastación de las poblaciones de diablos ha promovido la investigación del mecanismo de aparición del cáncer contagioso y las posibles estrategias para detenerlo. La comunidad científica y la población se preguntan si algún día ese tipo de tumores afectará a los humanos. La respuesta, al menos a corto plazo, parece ir a favor nuestro, aunque nuestra forma de proceder podría invertir la situación.

LA MALDICIÓN DEL DIABLO

Aparte de la aflicción del diablo de Tasmania, solo se conoce otro cáncer contagioso en la naturaleza: el tumor venéreo canino transmisible, que se calcula que apareció hace unos 10.000 años. La enfermedad se produce en los perros por la transferencia de células cancerosas durante la cópula. También se han generado tumores contagiosos mediante la manipulación de animales en el laboratorio. Y en ocasiones se ha transferido un cáncer de una persona a otra, en un trasplante de órganos, o de la madre al feto, durante la gestación. Pero, por regla general, la enfermedad empieza y termina en un único huésped, porque, a pesar de los estragos que causa en el cuerpo, diversos obstáculos impiden su salto de un individuo a otro. El cáncer infeccioso surgió en los diablos de Tasmania debido a una desgraciada confluencia de factores.

El cáncer típico, no contagioso, aparece cuando algunas células experimentan cambios genéticos que les hacen dividirse de manera incontrolada e invadir los tejidos. A medida que los tumores aumentan de tamaño, se convierten en comunidades complejas de células malignas y no malignas. En algún momento, las masas crecen hasta tal punto que el suministro de sangre y nutrientes se vuelve insuficiente. Del mismo modo en que procederían las plantas y animales salvajes, los tumores se ven obligados a dispersar las células desde su «lugar de nacimiento», y con ello perpetúan el cáncer. Algunas células se desprenden, se desplazan a través de la sangre o la linfa y se establecen en un lugar distante del cuerpo; es decir, producen metástasis. A menudo son los tumores metastásicos, y no el primario, los que matan a la víctima, lo que a su vez provoca la destrucción de los tumores. Este destino ejerce una fuerte presión sobre el cáncer, que intenta perpetuarse de una manera distinta: extendiéndose a otros individuos.

Pero esos intentos suelen verse frustrados una y otra vez. Sobre todo porque, para que las células pasen de un huésped a otro, el desplazamiento ha de ser rápido. Las células no están adaptadas para sobrevivir en el medio externo: tienden a desecarse y mueren a los pocos minutos de abandonar el cuerpo. Para transmitirse, las células cancerosas necesitan que el huésped original las ponga en contacto de algún modo con el tejido vivo de un nuevo huésped.

EN SÍNTESIS

En menos de 20 años ha aparecido un cáncer contagioso, el tumor facial del diablo de Tasmania, que ha empujado al marsupial al borde de la extinción.

El cáncer se hizo contagioso en parte debido a que los diablos suelen morderse unos a otros. Cuando lo hacen, algunas células del tumor, que crece en la cara y en la boca, se desprenden y penetran en las heridas del animal agredido, lugar donde arraigan.

Además, la mayoría de los diablos guardan entre sí un enorme parecido genético, de manera que su sistema inmunitario no reconoce como extrañas a las células cancerosas introducidas y no las destruye.

Los autores describen las condiciones en las que un cáncer humano se convertiría en contagioso, aunque tal situación no parece inminente.

GETTY IMAGES (*páginas anteriores*)

Una vez en este, las células tumorales invasoras han de evitar asimismo ser reconocidas. El sistema inmunitario de los animales superiores posee varios mecanismos para detectar y destruir las células foráneas, aquellas con un aspecto diferente de las del propio cuerpo. Las células exhiben en la superficie proteínas características del organismo del que proceden, que funcionan como señales; estas son identificadas por las defensas inmunitarias que a continuación se abalanzan sobre las células extrañas y las eliminan. Las proteínas de superficie están codificadas por diversos genes, entre ellos los del complejo principal de histocompatibilidad, que son muy variables. De hecho, algunos biólogos piensan que los genes de ese complejo, que ya existían en los animales vertebrados primitivos, se diversificaron en gran medida porque así se evitaba la transmisión del cáncer.

Lamentablemente, los diablos carecen de los mecanismos que impiden el contagio de esa enfermedad. El cáncer facial del diablo suele formarse en la boca o cerca de ella. Los animales se muerden con frecuencia unos a otros, durante el acto sexual o los combates, y a menudo lo hacen en la cara. Ese comportamiento facilita la transferencia de células malignas de un individuo a otro, ya sea por las incisiones con dientes revestidos de células de un tumor cercano, o bien por el contacto directo del tumor con las heridas de otro animal. El tumor venéreo del perro se transmite asimismo mediante contacto directo pero, en este caso, como resultado del contacto genital abrasivo durante la cópula. Tanto el cáncer del diablo como el del perro se tornan deleznables con el tiempo y al aumentar de tamaño, situación que favorece el desprendimiento de las células y la propagación de la infección.

Además, si la diversidad genética de una población se reduce (si la mayoría de los individuos poseen versiones muy semejantes de genes), el sistema inmunitario apenas verá como extrañas las células de otro organismo, con lo que no las atacará o, en el mejor de los casos, preparará una respuesta inmunitaria deficiente. Los diablos de Tasmania presentan una baja diversidad genética, en especial en sus genes del complejo principal de histocompatibilidad; ello tal vez se deba a una reducción drástica de las poblaciones en algún momento del pasado o a antiguas enfermedades de las que solo se libró un grupo de animales con una constitución genética similar. Asimismo, se piensa que el cáncer del perro surgió en una población pequeña, genéticamente restringida y endogámica, ya fuera en un grupo aislado de lobos o en una población que vivía en la época de la domesticación.

Los análisis genéticos han revelado el origen común de los tumores de los diablos, cuyas células descienden de un diablo muerto hace ya mucho tiempo; en particular, todas las excrecencias presentan una ausencia reveladora de determinados cromosomas y segmentos de cromosomas que no faltan en otras células de los animales enfermos. Debido a que la primera víctima desapareció hace tiempo, resultará difícil determinar la causa de las mutaciones iniciales que hicieron transmisible el cáncer en el animal. Pero el mal pudo haber surgido por mutaciones en células de la cara o cerca de la misma, como resultado de heridas repetidas e inflamación crónica, una etiología conocida como carcinogénesis de heridas. Elizabeth P. Murchison, del Instituto Sanger del Wellcome Trust, en Inglaterra, describió en 2010 una nueva característica del tumor de los diablos: la enfermedad se origina en células de Schwann, que forman las vainas de las neuronas fuera del sistema nervioso central.

La mezcla de factores que llevó a los tumores del diablo y del perro a hacerse contagiosos indicaría que el cáncer se torna infeccioso solo en contadas ocasiones, porque las condiciones requeridas (el contacto íntimo y la escasa diversidad genética) apenas se producen a la vez en la naturaleza. No obstante, algunas observaciones hacen pensar que el fenómeno resultaría más habitual de lo que se cree. Todas las aves y mamíferos luchan y copulan, y muchas poblaciones son muy endogámicas. Puede entonces que el cáncer infeccioso surgiera con mayor frecuencia de lo esperado, aunque la enfermedad no persistiría durante mucho tiempo en la naturaleza porque terminaría pronto con las poblaciones infectadas, y con ellas desaparecería el mal.

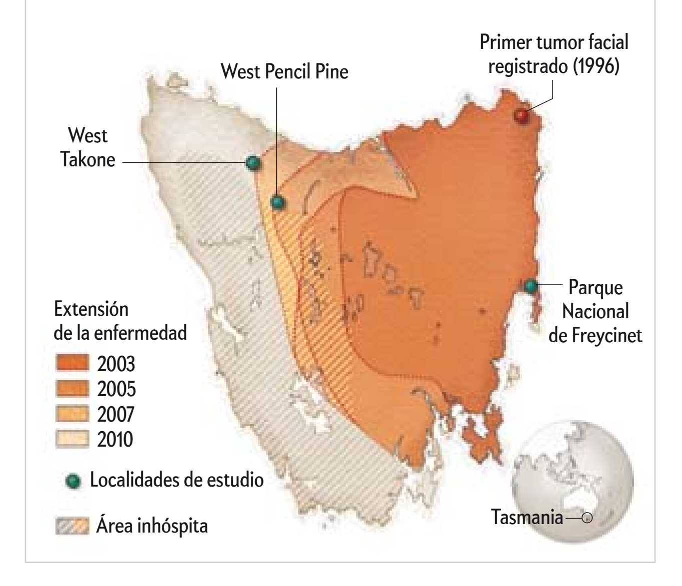
El cáncer del perro funciona según un modelo distinto: al principio los tumores consiguen ocultarse del sistema inmunitario, pero con el tiempo el sistema detecta las células malignas y las destruye, lo que confiere inmunidad a los animales frente a futuras infecciones. Podrían existir otros tipos de cáncer contagioso que no mataran a su víctima. Solo las investigaciones genéticas detalladas, como las que se llevan a cabo sobre los tumores del perro y del diablo, permitirán identificarlos.

SITUACIÓN APREMIANTE

Un mal en expansión



Desde que se descubrió en 1996 en el noreste de Tasmania, el tumor facial del diablo (*fotografía*) se ha propagado con rapidez (*mapa*) y ha reducido hasta en un 95 por ciento algunas poblaciones de diablos, como la del Parque Nacional de Freycinet. Veinte años antes, los animales medraban en la mayor parte de la isla, excepto en el suroeste, donde el terreno resulta inhóspito (*área rayada en el mapa*). Los diablos del extremo noroccidental son genéticamente distintos de los de otras regiones y demuestran cierta resistencia al cáncer. Los autores han iniciado estudios allí, con la esperanza de averiguar el modo de hacer crecer las poblaciones de la especie.



CORTESÍA DE RODRIGO HAMEDE, UNIVERSIDAD DE TASMANIA (*diablo*), MIKE SUDAL (*mapa*)

QUÉ CABE ESPERAR

El huésped y el patógeno suelen coevolucionar con el tiempo: el huésped desarrolla adaptaciones para detener al pató-

CAUSAS

El contagio del cáncer

El tumor que se propaga hoy entre los diablos de Tasmania procede de un único animal que adquirió la enfermedad hace unos 15 años. Una desgraciada combinación de factores ha permitido que los tumores malignos pasen de un animal a otro en un círculo vicioso.



Transferencia de células cancerosas

En el aire, las células sobreviven poco tiempo, por lo que solo pueden pasar de un individuo a otro mediante una inyección directa en el cuerpo del receptor. Dicho paso es facilitado por la conducta de los diablos: el tumor, que tiende a desprender células, crece en la cara y es inyectado de forma célere en las heridas cuando los animales afectados se muerden entre sí durante la cópula o en sus luchas frecuentes.

Ausencia de rechazo inmunitario

En la mayoría de las especies, la entrada de células tumorales en el cuerpo provocaría una respuesta inmunitaria vigorosa, ya que la distinta constitución genética de esas células con respecto a las del huésped señala la presencia de un invasor. No ocurre así en los diablos, la mayoría de los cuales guardan entre sí un alto parecido genético. El sistema inmunitario de los animales suele eliminar los patógenos, pero pasa por alto las células tumorales, que proliferan sin dificultad. El cáncer acaba matando al huésped, pero a menudo lo hace después de que los animales enfermos hayan pasado a otros la enfermedad.

MIKE SUDAL

geno, este emprende contramedidas y, en último término, ambos persisten. Nos preguntábamos si se podrían descubrir indicios de esta danza evolutiva entre el cáncer contagioso y el diablo de Tasmania, y con ello hallar algún atisbo de esperanza para los animales. Así ocurrió.

Los diablos están experimentando una intensa presión evolutiva y se han visto forzados a desarrollar rasgos que les permitan mejorar la supervivencia o aumentar la reproducción. En concreto, se ha observado que los animales procrean antes. En el pasado, las hembras empezaban a reproducirse a los dos años de edad y criaban unas tres camadas a lo largo de su vida, de cinco a seis años de duración; en muchos animales, la enfermedad ha reducido el número de camadas a una. Las hembras juveniles que crecen lo bastante rápido en los primeros meses después del destete crían una camada un año antes de lo habitual, si pueden parir sus cachorros antes de que llegue el invierno; esta procreación temprana les da la oportunidad de criar al menos una camada, o quizá dos, antes de sucumbir al cáncer. Con el paso del tiempo, ese comportamiento podría ayudar a mantener el número de individuos de la especie.

Junto con Rodrigo Hamede, estudiante de doctorado, estamos buscando otras señales de evolución en los animales que viven en la región noroccidental de Tasmania, relativamente aislada. Esa población de diablos alberga numerosos genes distintos de las versiones de los animales del este y parece más resistente a la enfermedad. El tumor, que ataca por primera vez a genotipos diferentes, no causa allí ninguna reducción de la población. La prevalencia de la enfermedad permanece baja, y los diablos infectados sobreviven con el cáncer durante mucho más tiempo que en la zona oriental. Varias veces al año visitamos diversas localidades del noroeste para observar la tendencia de la enfermedad y recolectar muestras de tejido y sangre que a continuación se analizan. Mediante el estudio de los genes y la respuesta inmunitaria, se intenta establecer si ciertas combinaciones de variantes genéticas confieren al sistema inmunitario de los animales una mayor capacidad para combatir el cáncer. Si logramos identificar genotipos con resiliencia a la enfermedad,

podremos ayudar a dispersar los genes beneficiosos en las poblaciones salvajes (por ejemplo, mediante la introducción de los animales resistentes en otras partes de Tasmania) y favorecer la recuperación de la especie.

También se han observado cambios evolutivos en el propio tumor. Anne-Maree Pearse, genetista del Programa Salvemos al Diablo de Tasmania (proyecto patrocinado por los Gobiernos de Australia y Tasmania), ha determinado la existencia de diversas cepas, lo que presenta aspectos positivos y negativos. Por un lado, la variedad permite que algunas cepas evolucionen y se hagan menos virulentas; pero por otro, ofrece la oportunidad de superar cualquier resistencia que aparezca en la población de diablos.

La historia de la evolución del cáncer del perro nos hace albergar cierta esperanza. Tal como ocurre en muchas enfermedades, al principio el tumor canino debió manifestar una gran virulencia, igual que el del diablo; después, con el tiempo, el patógeno y el huésped perruno coevolucionaron y la virulencia se redujo, con lo que aumentó el éxito global del tumor: al disminuir la malignidad de la enfermedad, los huéspedes sobrevivían más tiempo con ella y tenían la oportunidad de transmitirla a otros animales. Esa pauta explicaría el modo en que el cáncer del perro se ha convertido en una infección poco mortífera.

Los tumores contagiosos no solo evolucionan, sino que también modifican el comportamiento de sus víctimas, de manera muy parecida a como lo hacen los parásitos con sus hospedadores para aumentar la transmisión. Los tumores caninos inducen en la hembra la producción de sustancias que promueven la receptividad sexual, con lo que aumenta la probabilidad de que el cáncer se transfiera a los machos. Cabe la posibilidad que se seleccionen las cepas del tumor que provocan mayor agresividad en el huésped, lo que favorecería el contagio. Pero también podrían seleccionarse las que dan lugar a una menor agresividad, porque los animales más mansos tenderían a luchar menos y se verían menos infectados. Estamos estudiando con interés la danza evolutiva entre el diablo y el cáncer.

Si se dedican esfuerzos y recursos suficientes, el diablo podría salvarse de la extinción y seguir desempeñando su papel histórico como depredador culminal en gran parte de su área de distribución. La desaparición del diablo en dichas regiones provocaría cambios en cascada en los ecosistemas (como un aumento de la depredación por parte de los gatos y zorros introducidos) que precipitarían la pérdida de otras especies. Esa pauta ha llevado ya a la extinción de varios marsupiales pequeños en Australia; Tasmania representa hoy su último refugio. El éxito de los esfuerzos destinados a impedir la extinción del diablo dependerá de lo que aprendamos sobre la evolución del tumor en el noroeste de Tasmania.

RIESGO DE CONTAGIO ENTRE LOS HUMANOS

Puesto que los humanos presentan una gran diversidad genética y pueden evitar las conductas que fomentarían la transmisión de un tumor, cabe suponer que nuestra especie no correrá la suerte de los diablos de Tasmania. De hecho, aun en el caso de que un humano resultara mordido por un diablo infectado o por un perro con el tumor canino transmisible, la diferente constitución genética de la persona con respecto a la del animal sin duda daría lugar a una respuesta inmunitaria fuerte que destruiría las células invasoras; por tanto, los individuos mordidos no enfermarían y el tumor tampoco se podría transmitir.

No obstante, hay motivos de preocupación. En teoría, podría surgir un cáncer contagioso en un grupo de grandes simios (chimpancés, gorilas u orangutanes), que exhiben una escasa diversidad genética debido a la reducción de sus poblaciones. Si dichos animales fueran cazados por poblaciones humanas con la inmunidad menoscabada, el contacto cercano con ellos permitiría que las células tumorales se transmitieran a los humanos y se propagaran entre ellos. Estas condiciones se producen allí donde los humanos con una prevalencia elevada de VIH cazan simios amenazados. Aunque dicha situación hipotética es posible, pensamos que no representa el mayor peligro de aparición de un cáncer contagioso en los humanos. Opinamos así en parte porque en la naturaleza no se conoce ningún caso de transmisión del cáncer del perro a otra especie (aunque en el laboratorio sí se ha logrado transferir a otros cánidos con distinto grado de parentesco).

Aun así, el crecimiento acelerado de la población humana está transformando el mundo de manera insólita. El VIH ha infectado a millones de personas, a quienes ha debilitado el sistema inmunitario y provocado la aparición de tumores antaño considerados raros. Esta situación resulta propicia para la evolución de un cáncer contagioso. Cabe la posibilidad de que la enfermedad surja en humanos inmunodeprimidos y que más tarde adquiera la capacidad de infectar a la población general. Así fue como sucedió en los perros: el cáncer canino transmisible, que apareció en una población endogámica y genéticamente homogénea, infecta hoy a poblaciones de perros y lobos con una alta diversidad genética. Que el cáncer perruno en la actualidad no provoque la muerte a su víctima no resulta muy tranquilizador. Tal como ya se ha indicado, la enfermedad sin duda atravesó un período de gran virulencia (como sucede hoy con el VIH), antes de que algunas poblaciones de individuos que podían controlar el cáncer de forma natural se expandieran y se volvieran predominantes.

El cáncer del diablo proporciona a los biólogos una oportunidad única de aprender acerca de los tumores contagiosos. También sirve para recordarnos con crudeza las consecuencias de la actividad humana sobre nuestro planeta. Al liberar cantidades enormes de carcinógenos en el ambiente y destruir los hábitats naturales del mundo, provocamos la desaparición de especies y reducimos la diversidad genética. El comercio global y la destrucción de hábitats ponen por primera vez en contacto a humanos y animales salvajes con ciertos patógenos. En consecuencia, cabe esperar un aumento de nuevos tipos de cáncer, contagiosos e inducidos por virus u otros patógenos, en la fauna salvaje. No se puede descartar que estas enfermedades malignas lleguen a pasar algún día de una especie a otra... incluso a los humanos.

PARA SABER MÁS

To lose both would look like carelessness: Tasmanian devil facial tumour disease. Hamish McCallum y Menna Jones en *PLoS Biology*, vol. 4, n.º 10, págs. 1671-1674, 17 de octubre de 2006.

Conservation management of Tasmanian devils in the context of an emerging, extinction-threatening disease: devil facial tumour disease. Menna E. Jones et al. en *EcoHealth*, vol. 4, n.º 3, págs. 326-337, septiembre de 2007.

Life-history change in disease-ravaged Tasmanian devil populations. Menna E. Jones et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 29, págs. 10.023-10.027, 22 de julio de 2008.

Transmission dynamics of Tasmanian devil facial tumor disease may lead to disease-induced extinction. H. McCallum et al. en *Ecology*, vol. 90, n.º 12, págs. 3379-3392, diciembre de 2009.

Evidence that disease-induced population decline changes genetic structure and alters dispersal patterns in the Tasmanian devil. Shelly Lachish et al. en *Heredity*, vol. 106, n.º 1, págs. 172-182, enero de 2011.

Salvemos al Diablo de Tasmania (iniciativa de los gobiernos de Australia y Tasmania): **www.tassiedevil.com.au/tasdevil.nsf**



Manuel Elices Calafat y **Gustavo V. Guinea Tortuero**, ingenieros de caminos y físicos, son ambos catedráticos del departamento de ciencia de materiales en la Universidad Politécnica de Madrid. **José Pérez Rigueiro**, biólogo molecular y doctor en física, y **Gustavo R. Plaza Baonza**, ingeniero industrial y de materiales, son profesores del mismo departamento.



MATERIALES

Usos médicos de la seda

Las excelentes propiedades de este biomaterial se conocen desde antaño. Se están desarrollando ahora nuevas aplicaciones en la reparación de tejidos y en farmacología

Manuel Elices, José Pérez Rigueiro, Gustavo R. Plaza, Gustavo V. Guinea

En la batalla de Crécy, en 1346, los soldados mallorquines al servicio del rey francés Felipe VI llevaban en su botiquín unas cajitas repletas de telarañas para taponar posibles heridas. El combate, con victoria de los ingleses comandados por Eduardo III, demostró la eficacia del arco inglés usado en masa contra la caballería acorazada francesa y, según algunos historiadores, marcó el comienzo del declive de la edad de la caballería.

Las propiedades hemostáticas de las telarañas ya fueron descritas por Plinio el Viejo, hace unos 2000 años. Aunque esta costumbre se ha abandonado entre los humanos, parece ser que se practica todavía con animales domésticos. Su éxito, si bien relativo —no funciona en caso de infección— podría deberse a que la seda de la telaraña se halla recubierta con hongos que contienen antibióticos para evitar que otros microorganismos se coman la tela rica en proteínas.

Los hilos de seda de los gusanos de seda también se han utilizado a modo de biomaterial para suturar heridas. Desde hace un siglo se observaron sus ventajas frente al catgut, al ser más biocompatible y provocar menos infecciones. Incluso hay indicios del uso del hilo de seda en épocas anteriores: Trotula, ginecóloga de Salerno, comenta la utilización de suturas con hilo de seda en intervenciones del perineo en su libro *Cura de las enfermedades de la mujer, antes, durante, y después del parto*, publicado alrededor de 1050.

En la actualidad se ha avivado el interés científico por la seda —un material que ha evolucionado de forma independiente en arañas y en numerosos insectos— debido a la excelente combinación de sus propiedades mecánicas, biocompatibilidad, biodegradación y fabricación respetuosa con el ambiente. Ya se vislumbra un brillante futuro para las sedas en la ingeniería de tejidos, farmacología y dispositivos de diagnóstico y control médico.

EN SÍNTESIS

El hilo de seda, constituido por proteínas, posee unas propiedades mecánicas excepcionales. Su gran resistencia y deformabilidad le permiten absorber una enorme cantidad de energía antes de romperse.

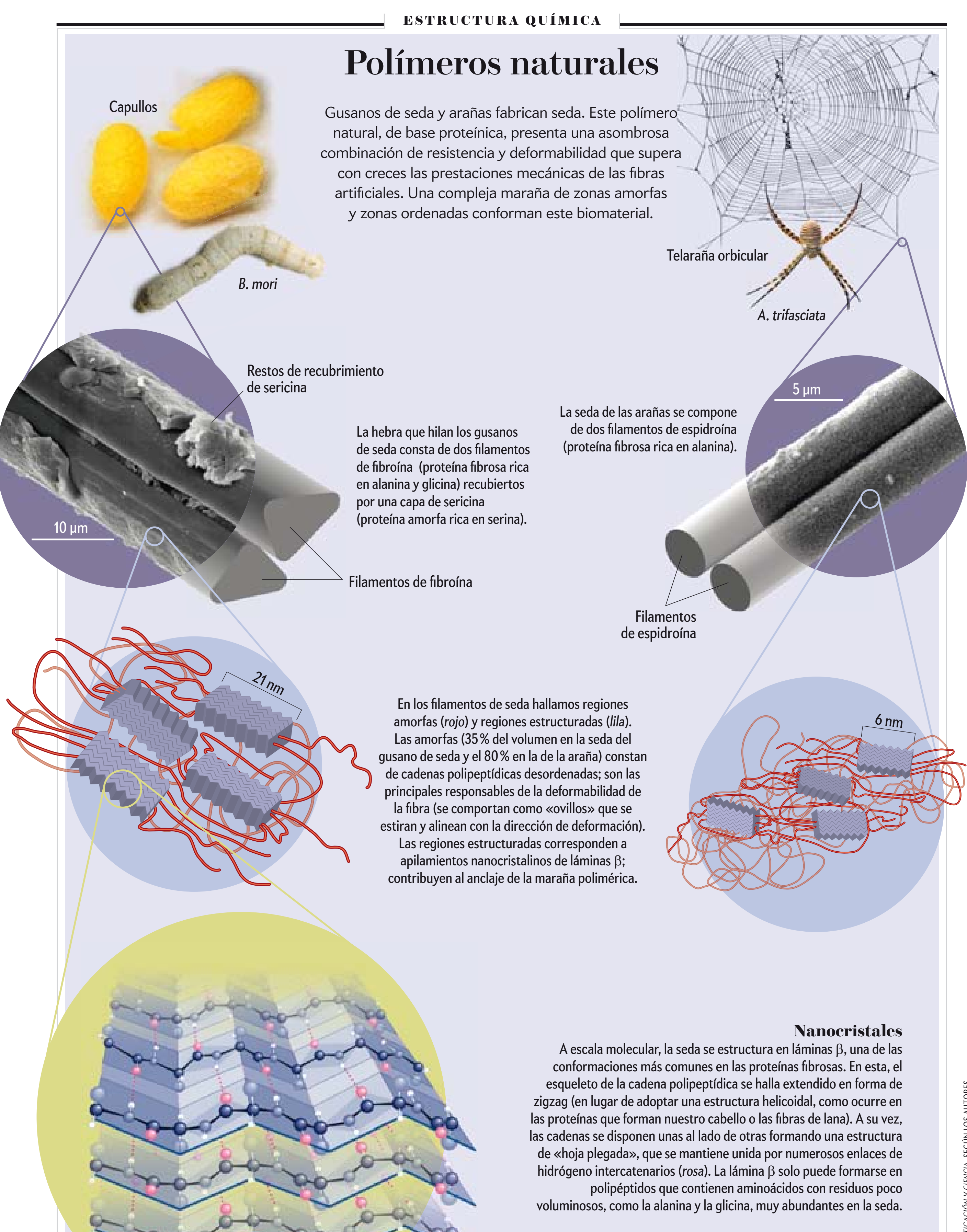
La seda constituye un biomaterial idóneo para la ingeniería de tejidos. Facilita la adhesión de las células, estimula su crecimiento y permite la diferenciación. Es biocompatible, resistente y biodegradable.

Inspirándose en el biomimetismo, la fabricación de sedas mediante ingeniería genética permitirá diseñar y desarrollar fibras de altas prestaciones y con una gran variedad de aplicaciones médicas.

CARY WOLINSKY, AURORA IMAGES



De los capullos de los gusanos de seda domesticados *Bombyx mori* se obtiene la mayor parte de la seda.



Polímeros naturales
Gusanos de seda y arañas fabrican seda. Este polímero natural, de base proteínica, presenta una asombrosa combinación de resistencia y deformabilidad que supera con creces las prestaciones mecánicas de las fibras artificiales. Una compleja maraña de zonas amorfas y zonas ordenadas conforman este biomaterial.
Capullos
B. mori
Telaraña orbicular
A. trifasciata
Restos de recubrimiento de sericina
10 μm
La hebra que hilan los gusanos de seda consta de dos filamentos de fibroína (proteína fibrosa rica en alanina y glicina) recubiertos por una capa de sericina (proteína amorfa rica en serina).
Filamentos de fibroína
La seda de las arañas se compone de dos filamentos de espidroína (proteína fibrosa rica en alanina).
5 μm
Filamentos de espidroína
21 nm
6 nm
En los filamentos de seda hallamos regiones amorfas (rojo) y regiones estructuradas (lila). Las amorfas (35 % del volumen en la seda del gusano de seda y el 80 % en la de la araña) constan de cadenas polipeptídicas desordenadas; son las principales responsables de la deformabilidad de la fibra (se comportan como «ovillos» que se estiran y alinean con la dirección de deformación). Las regiones estructuradas corresponden a apilamientos nanocristalinos de láminas β; contribuyen al anclaje de la maraña polimérica.
Nanocristales
A escala molecular, la seda se estructura en láminas β, una de las conformaciones más comunes en las proteínas fibrosas. En esta, el esqueleto de la cadena polipeptídica se halla extendido en forma de zigzag (en lugar de adoptar una estructura helicoidal, como ocurre en las proteínas que forman nuestro cabello o las fibras de lana). A su vez, las cadenas se disponen unas al lado de otras formando una estructura de «hoja plegada», que se mantiene unida por numerosos enlaces de hidrógeno intercatenarios (rosa). La lámina β solo puede formarse en polipéptidos que contienen aminoácidos con residuos poco voluminosos, como la alanina y la glicina, muy abundantes en la seda.

POLÍMERO NATURAL

Las sedas son proteínas, es decir, polímeros de aminoácidos. Se conocen más de 30.000 especies de arañas y más de 113.000 especies de lepidópteros que producen hilos de seda. En lo sucesivo nos referiremos, casi siempre, a dos tipos de sedas: la de los capullos de los gusanos de seda domesticados *Bombyx mori* y la que produce la araña *Argiope trifasciata* para fabricar la telaraña —las sedas que mejor conocemos por nuestra experiencia investigadora.

Hace más de 4600 años, según una leyenda china, la princesa Xi Ling Shi paseaba en su jardín con una taza de té en la mano. El azar quiso que un capullo de un gusano de seda cayera en su taza. Al intentar sacarlo, observó que podía obtener un delicado, lustroso e iridiscente hilo de la blanda masa formada por el calor de la infusión. Este accidente fue el origen del arte y la industria de la seda. Los chinos habían descubierto el modo de trabajar los capullos de los gusanos de seda para obtener un hilo más largo, fino y brillante que cualquier otra fibra natural.

La mayoría de los gusanos de seda pertenecen a la especie domesticada *Bombyx mori*; producen seda durante cierta etapa de su ciclo biológico. La hebra que hilan, realizando con su cabeza un movimiento en forma de ocho, consta de dos filamentos de fibroína (proteína fibrosa en la que predominan la alanina y la glicina) recubiertos por una goma de sericina (proteína amorfa rica en serina). El diámetro de los filamentos es de unos 10 μm (un cabello humano tiene unos 100 μm). Las fibras de seda se extraen de los capullos que previamente se han hervido en agua jabonosa para eliminar el recubrimiento de sericina. De cada capullo se obtienen entre 300 y 1200 metros. A principios del siglo xx los japoneses alcanzaron un récord: obtuvieron una variedad de gusano cuyo capullo proporcionaba dos kilómetros de fibra.

La seda de las arañas es, posiblemente, la fibra natural de más altas prestaciones mecánicas. Sin embargo, hasta la fecha no se ha podido utilizar de forma industrial porque las arañas son de costumbres solitarias y depredadoras, por lo que no se han sabido domesticar, como hicieron los chinos con los gusanos de seda. Hasta mediados del siglo xx, los hilos de seda de la araña se utilizaban solo para fabricar las retículas de los instrumentos ópticos. Los nativos de Nueva Guinea, Nuevas Hébridas y de la isla Salomón, han utilizado los hilos de seda de las arañas del género *Nephila* para fabricar redes y artificios para pescar, según describió en 1906 el naturalista E. A. Pratt en su curioso libro *Dos años entre los caníbales de Nueva Guinea*. En 1709, Bon de Saint-Hilaire fabricó guantes y medias a partir de la seda de los sacos ovígenos, pero la Academia Francesa consideró que la industria de la seda basada en arañas nunca sería rentable.

Las fibras de seda pueden recogerse de la telaraña, pero resulta más conveniente extraerlas directamente de la araña mediante un proceso de «hilado forzoso». Para ello se la inmoviliza y se tira de la hebra —de la misma forma que lo hace la araña con sus patas cuando teje la telaraña—, que se recoge en un cilindro. Por este procedimiento se pueden obtener unos seis metros en unos pocos minutos. Con una variante de esta técnica, desarrollada por los autores, que permite controlar la velocidad y la fuerza del hilado, se consigue un material homogéneo y reproducible.

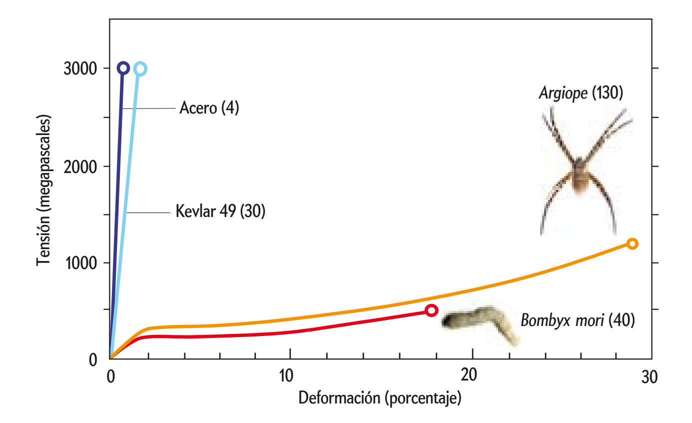
Una misma araña puede tejer sedas distintas para funciones diferentes, cada una con una composición aminoacídica característica. El artrópodo dispone para ello de distintas glándulas y espitas abdominales. La proteína de los hilos procedentes de la glándula ampollácea mayor (seda estructural, utilizada para fabricar el armazón de la telaraña y como hilo de seguridad) se denomina espidroína (un barbarismo, que etimológicamente sería más correcto sustituir por «arañina») y está compuesta, también, por dos cadenas de aminoácidos de varios cientos de kDa cada una.

RESISTENTE Y DEFORMABLE

Las propiedades mecánicas de los hilos de seda, en particular el de la araña, son espectaculares cuando se comparan con los hilos de acero y con otras fibras artificiales de altas prestaciones: la tensión de rotura para hilos muy finos de acero y para las fibras artificiales de kevlar 49 se sitúa alrededor de los 3000 megapascales (MPa); los hilos de la humilde *A. trifasciata* pueden alcanzar los 1000 MPa y otras especies de arañas alcanzan los 4000 MPa.

Pero la resistencia no es lo más importante. Lo verdaderamente asombroso es la combinación de resistencia y deformabilidad: los hilos de acero, o las fibras de altas prestaciones, se rompen con una deformación del 1 o del 2 por ciento; los hilos de seda, en cambio, llegan a superar deformaciones del 30 por ciento. Estas dos propiedades juntas (gran resistencia y deformabilidad) son las que convierten a la seda en un material único, porque permiten que el hilo pueda absorber una gran cantidad de energía antes de romperse; 130 kilojulios por kilogramo (kJ/kg) para el hilo de araña (*Argiope trifasciata*), frente a 30 kJ/kg para el kevlar 49 (fibra DuPont) y apenas 4 kJ/kg para una cuerda de piano de acero eutectoide. El hilo del gusano de seda (*Bombyx mori*), con una resistencia menor de alrededor de 600 MPa, todavía es capaz de almacenar una energía de 40 kJ/kg, superior a la de las mejores fibras artificiales.

Tanto los capullos de los gusanos de seda como las telarañas constituyen un prodigio de la ingeniería estructural. Fijémonos, brevemente, en las telarañas: la naturaleza nos ha proporcionado una hermosa y delicada estructura que no deja de sorprendernos. Parece ser que la evolución la ha orientado hacia una configuración destinada a resistir con gran eficacia el impacto de las presas y, a la vez, minimizar los materiales utilizados y el tiempo de su construcción. Un gran reto para cualquier inge-



Curvas de tensión y deformación para dos fibras artificiales (acero y kevlar 49) y dos fibras naturales (seda de araña y de gusano de seda). Gracias a una asombrosa combinación de resistencia y deformabilidad, la seda absorbe una gran cantidad de energía antes de romperse (valores entre paréntesis, en kilojulios por kilogramo), muy superior a las fibras artificiales.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

La nueva ruta de la seda

De hilos tejidos por gusanos a tendones, arterias, circuitos eléctricos y hologramas

FIORENZO OMENETTO Y DAVID KAPLAN

La ruta de la seda fue durante un milenio la vía de entrada en Europa de este material, tan hermoso como resistente, que traído desde Extremo Oriente era convertido en ropajes deslumbrantes. Ahora, los bioingenieros están añadiendo enzimas y semiconductores en las fibras de esta proteína natural que los gusanos de seda hilan. Las finas hebras de los capullos son sometidas a procesos térmicos, modificadas por tensado o por tratamientos químicos en medio ácido, y otras diversas formas, con el propósito de crear materiales nuevos dotados de notables propiedades.

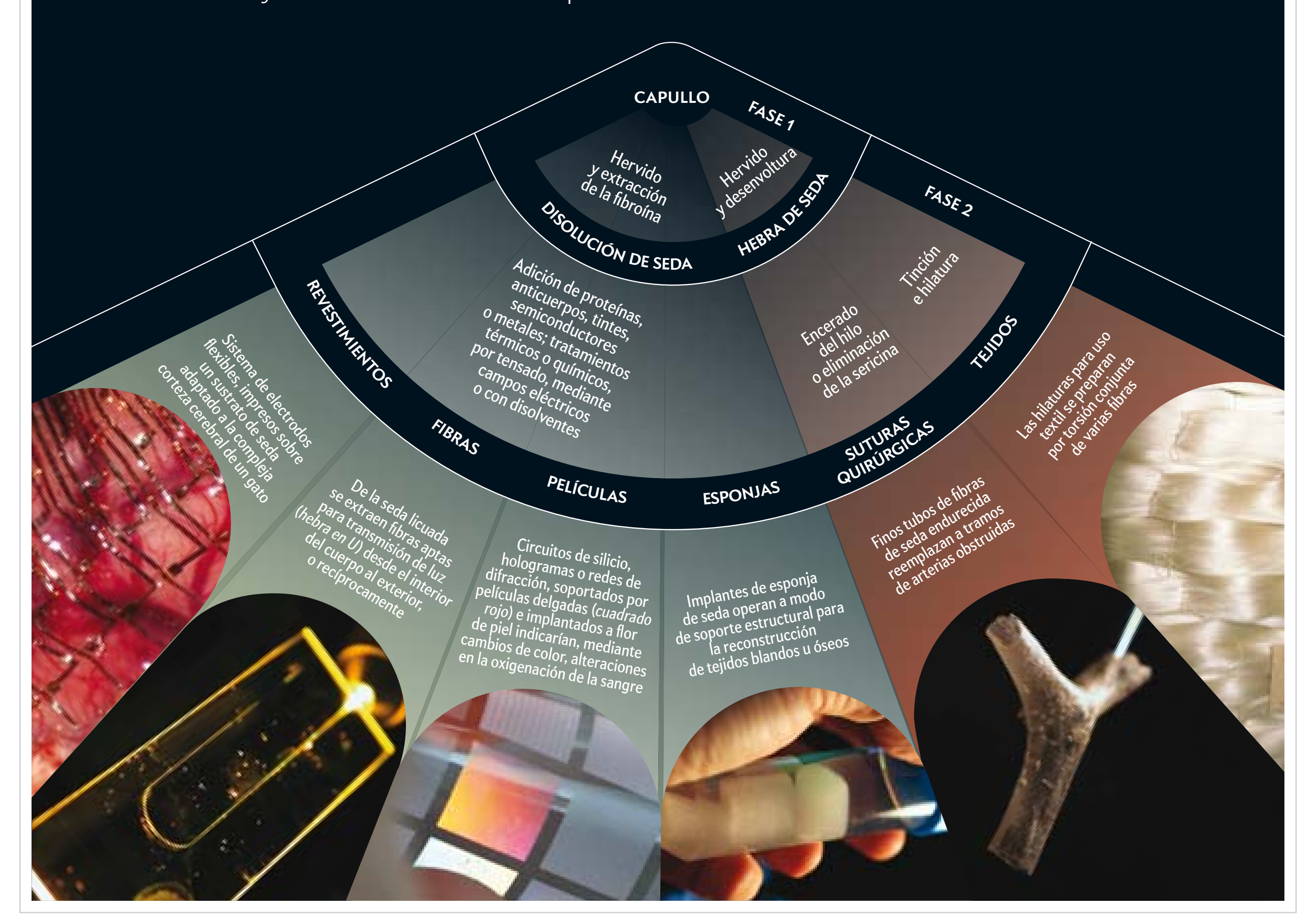
En cirugía se utiliza hilo de seda para las suturas, por su resistencia y compatibilidad con los tejidos humanos (el sistema inmunitario no lo rechaza). En nuestro laboratorio de la Universidad Tufts hemos ampliado estas propiedades para obtener tubos delgados utilizables en implantes de sustitución de tramos de arterias obstruidas, lo que podría evitar la extracción de venas de la pierna del paciente para revascularizaciones coronarias, el procedimiento habitual. Por otra parte, James Goh y sus colaboradores, de la Universidad Nacional de Singapur, han regenerado un ligamento cruzado anterior en la rodilla de un cerdo vivo valiéndose de células pluripotentes implantadas sobre una plantilla de seda.

Esa biocompatibilidad permite también el diseño de interesantes sensores. Ingenieros de Tufts, entre otros, han confeccionado materiales electrónicos y fotónicos modelando metales o películas delgadas sobre superficies de seda. Tal vez algún día sea posible insertar en las honduras del cerebro estas finas películas, para tratar lesiones epilépticas o de la médula espinal. Se han ensayado ya en animales implantes de seda que liberan lentamente principios activos, concebidos para evitar ataques epilépticos.

Se prevé que sensores implantados permitan la supervisión electrónica de nutrientes, dosis de fármacos, contenidos celulares en sangre o en otros tejidos, y datos que serían registrados y transmitidos ópticamente mediante fibras de seda. No sería imposible diseñar tales dispositivos de modo que se degradasen al concluir su vida útil, sin necesidad de intervención quirúrgica. Podemos programar seda para que se disuelva a cabo de un tiempo determinado, mediante el ajuste del tamaño y la disposición de la estructura cristalina de la proteína (responsable del brillo y cabrilleo de los tejidos de seda).

También caben progresos por vía genética. En septiembre de 2010, los laboratorios Kraig Biocraft, de Lansing, en Michigan, anunciaban haber modificado genéticamente gusanos de seda, haciéndolos producir seda de araña. Al ofrecer esta mayor resistencia a la tracción que la seda tradicional, podría aplicarse a la obtención de tendones artificiales o chalecos antibalas.

Fiorenzo Omenetto y David Kaplan profesan la ingeniería biomédica en la Universidad Tufts



WOLFGANG KAEHLER *CORBIS* (*hilatura*); CORTESÍA DE FIORENZO OMENETTO (*arteria, esponjas, películas, fibras ópticas*); DE "DISSOLVABLE FILMS OF SILK FIBRON FOR ULTRATHIN CONFORMAL BIO-INTEGRATED ELECTRONICS", POR DALE-HYEONG KIM ET AL. EN *NATURE MATERIALS*, VOL. 9, JUNIO 2010 (*cerebro*)

Las fibras más resistentes y tenaces las fabrican las arañas (en la fotografía, *Argiope trifasciata*). Sin embargo, debido a su naturaleza solitaria y depredadora, estos artrópodos no pueden criarse de forma masiva. Las investigaciones para la producción industrial de este biomaterial se proponen identificar los genes arácnidos responsables de la fabricación de las proteínas de la seda, sintetizarlos y, por fin, expresarlos en otros organismos más fáciles de domesticar.



MANUEL ELICES

niero de nuestro tiempo. La naturaleza lo ha conseguido mediante la optimización del diseño estructural y la fabricación de los materiales.

Los ingenieros y los arquitectos suelen inspirarse en la naturaleza para encontrar soluciones a sus problemas. Las telarañas pueden ser una buena fuente de ideas, tanto más cuanto mejor conozcamos su estructura y funcionamiento. No se trata de imitarlas —no somos arañas— sino de aplicar a las creaciones humanas los conocimientos adquiridos. Se ha especulado que si fuéramos capaces de fabricar una red a escala humana, semejante a las redes de las telarañas, podríamos atrapar a un avión comercial durante el aterrizaje y, quizás, evitar un accidente. De momento, la distribución jerarquizada de rigideces en diversos componentes puede ofrecer una valiosa guía para diseñar estructuras ligeras de mallas tesas y el amortiguamiento dinámico observado puede dar algunas pistas para el diseño de puentes atirantados. Las redes para pescar aviones pertenecen todavía al ámbito de la ciencia ficción.

Los hilos de seda, como biomateriales, están destinados a tener un gran protagonismo en medicina, no solo por sus propiedades mecánicas, sino también por su biocompatibilidad, estabilidad térmica y facilidad de esterilización, biodegradabilidad y capacidad de ser modificados genéticamente. La exploración de sus posibilidades acaba de empezar. La medicina regenerativa ha puesto grandes esperanzas en estas fibras.

BIOMATERIALES PARA IMPLANTES

Los hilos de seda tendrán un gran protagonismo en los implantes de tejidos y órganos. La selección tradicional de biomateriales para implantes buscaba materiales que fueran inertes (que interaccionaran lo menos posible con el organismo) para no entorpecer el crecimiento y la actividad natural de las células en contacto con el biomaterial. Pero este objetivo no ha sido realista, por inviable. En la actualidad se buscan materiales que interaccionen de forma adecuada con su entorno biológico. La ingeniería de tejidos —como se llama ahora a esta especialidad médica— busca materiales que proporcionen a las células implantadas un sustrato (andamio) para que se adhieran y un soporte físico que guíe la formación de nuevos órganos. Las células trasplantadas adheridas al andamio proliferan, segregan sus propias matrices extracelulares y estimulan la formación de nuevos tejidos. Durante este proceso, el sustrato se va degradando y puede llegar a desparecer [*veáse* «Regeneración ósea», por Maria Pau Ginebra Molins; Investigación y Ciencia, julio de 2011]. El biomaterial del andamio debe ser un material multifuncional, capaz de facilitar la adhesión de las células, estimular su crecimiento y permitir la diferenciación. También debe ser biocompatible, poroso, resistente, maleable y biodegradable. Requisitos que cumplen los hilos de seda.

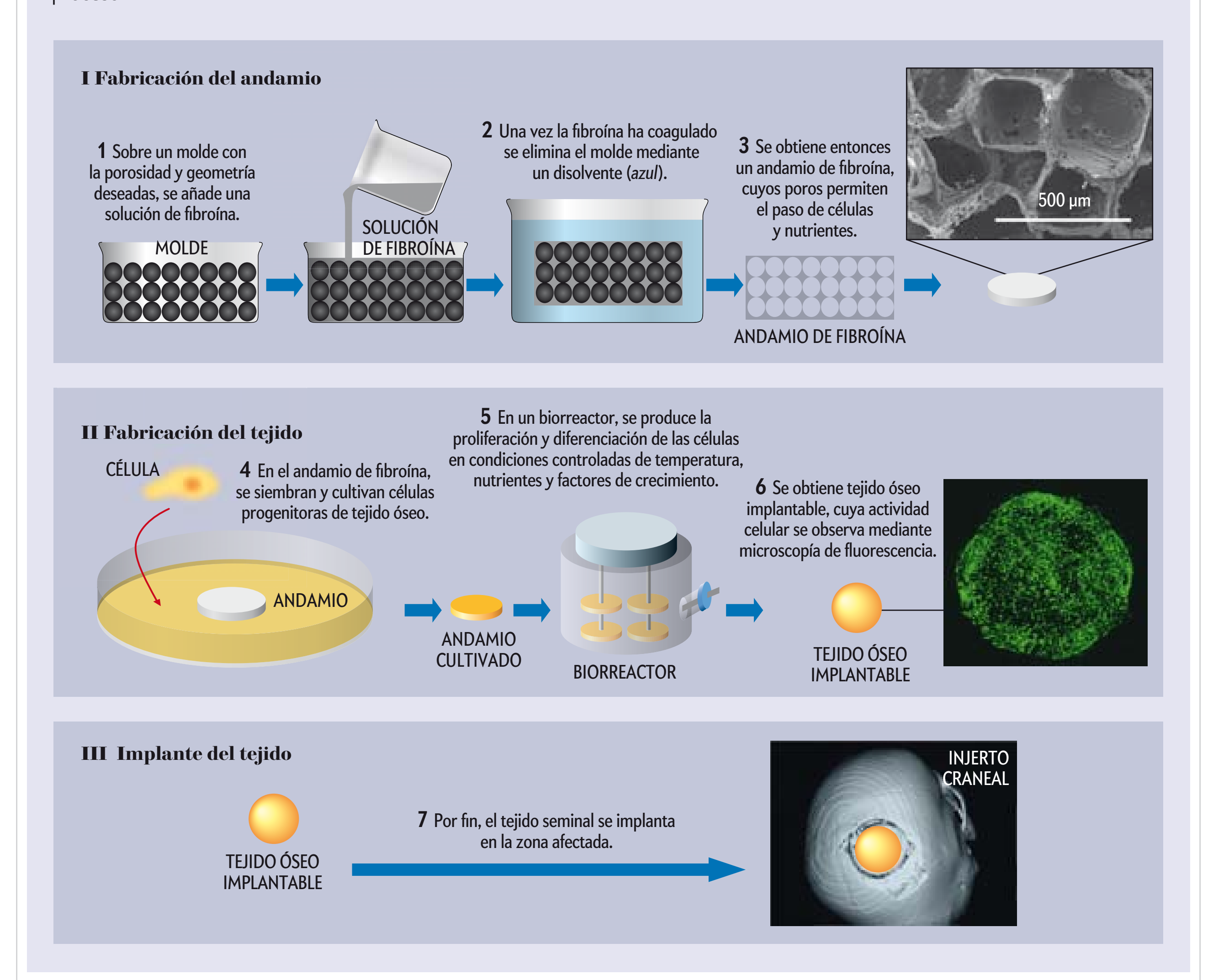
Una aplicación prometedora corresponde a la producción de tejido óseo. Los implantes metálicos tienen, a largo plazo, problemas de adherencia. Los implantes autólogos (de la propia persona) adolecen de otros inconvenientes: la lesión producida y el tiempo de rehabilitación. La solución basada en un implante resistente y con capacidad de facilitar la fabricación de tejido óseo análogo al del receptor es la mejor. Con los hilos de seda se pueden fabricar estructuras porosas y resistentes que, una vez sembradas con las células adecuadas, se degraden lentamente y permitan que el implante se remodele con el tiempo. La paulatina degradación del andamiaje de seda permite controlar la deposición de hidroxiapatita y colágeno que acaba formando una matriz trabecular (formada por barras diminutas) como la del hueso.

El tejido cartilaginoso ofrece otra oportunidad para las sedas. Las lesiones del cartílago son difíciles de tratar porque este se regenera con dificultad. Una solución consiste en fabricar tejidos basados en matrices que permitan la regeneración del cartílago, es decir, que sean biocompatibles, resistentes, flexibles, que faciliten el desarrollo celular y que a su debido tiempo se reabsorban. Ya se han llevado a cabo intentos mediante el uso de capullos de seda de la araña de jardín (*Araneus diadematus*) con resultados satisfactorios por Paul Kiekens y su equipo, de la Universidad de Gante.

Otra aplicación atractiva de las sedas surge de la reconstrucción del ligamento cruzado anterior, una opción muy interesante por la cantidad de roturas que se producen y por la dificultad de su recuperación. Se han fabricado haces de cordones con hilos de seda que se han sembrado con las células adecuadas y se han instalado en biorreactores donde se han sometido a esfuerzos que simulan la biomecánica de la rodilla humana. Al cabo de cierto tiempo se ha observado que la matriz de seda favorece la adherencia celular, el asentamiento de los productos extracelulares y que se genera un tejido similar al del ligamento. Los primeros intentos los ha realizado con seda del gusano

Fabricación de tejido óseo

Los hilos de seda constituyen un biomaterial idóneo para la ingeniería de tejidos: facilitan la adhesión de las células, estimulan su crecimiento y permiten la diferenciación; además, son biocompatibles, porosos, resistentes, maleables y biodegradables. De ahí que una de las aplicaciones más prometedoras de este material corresponda a la producción de tejido óseo: a partir de la fibroína (la proteína de la seda que hilan los gusanos de seda) se fabrican estructuras porosas y resistentes que, una vez sembradas con las células adecuadas, se degradan lentamente y permiten que el implante se remodele con el tiempo. Estas son las etapas básicas del proceso.



ADAPTADO DE sackler.tufts.edu/Academics/Degree-Programs/PhD-Programs/Faculty-Research-Pages/David-Kaplan.aspx

de seda James C. H. Goh y sus colaboradores, de la Universidad nacional de Singapur; se espera mejorar los resultados cuando se utilice seda de araña.

BIOSENSORES Y MICROCÁPSULAS

La integración de componentes electrónicos en sistemas biológicos se enfrenta con la dificultad de compatibilizar la rigidez de las obleas de silicio con la flexibilidad de los tejidos. Estas diferencias, mecánicas y geométricas, acaban casi siempre en un mal funcionamiento del dispositivo. Las láminas de seda pueden ofrecer una adecuada solución al problema porque son biocompatibles, permiten la incorporación de circuitos, son resistentes y a su vez flexibles, transparentes, funcionalizables y degradables.

El equipo de David Kaplan, de la Universidad Tufts, está desarrollando dispositivos electrónicos embebidos en películas delgadas de seda que pueden integrarse en las superficies blandas y curvilíneas de los tejidos biológicos. Ofrece importantes oportunidades para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades y para mejorar la interfaz entre cerebro y máquina.

También la industria farmacéutica saca provecho del material de marras. Con las sedas pueden fabricarse microcápsulas para administrar fármacos que sean biocompatibles, resistentes y fácilmente funcionalizables.

Los hilos de seda de la araña de jardín han inspirado ese tipo de cápsulas. Mediante ingeniería genética, T. Scheibel y sus colaboradores, de la Universidad de Bayreuth, han fabricado una proteína, C_{16}, que imita parcialmente la proteína ADF-4



Las fibras artificiales con altas prestaciones requieren un proceso de fabricación industrial contaminante. Las sedas resistentes, en cambio, podrían obtenerse a partir de cabras, plantaciones de algodón o de girasoles.

que segrega la araña. Las microcápsulas se forman cuando C_{16} se adsorbe sobre microgotas de aceite que previamente se ha emulsionado en una solución acuosa. El tamaño de las microcápsulas puede controlarse mediante el ajuste del tamaño de las gotas; por este procedimiento se obtienen cápsulas de entre 1 y 30 micras de diámetro. La microestructura de las cápsulas guarda semejanza con la del hilo de seda de la araña; ello les confiere gran resistencia y tenacidad, lo cual es necesario si deben almacenar ingredientes muy concentrados y soportar la elevada presión osmótica que van a generar. Otro aspecto de gran interés es la posibilidad de funcionalizar la proteína C_{16} durante su producción, adaptándola a las necesidades del fármaco. Para ello, si se incorporan determinadas secuencias de aminoácidos se puede conseguir que la membrana se degrade en presencia de enzimas específicas de los tejidos a donde va dirigido el fármaco.

SEDAS DEL FUTURO

Las excelentes propiedades de las sedas, tanto de los gusanos de seda como de las arañas, han despertado el interés por la obtención de estos materiales mediante ingeniería genética.

En la actualidad, casi toda la seda procede de la sericultura con el gusano domesticado *B. mori*. Esta producción abastece las demandas de los mercados textil, de suturas médicas y soportes para ingeniería de tejidos. Sin embargo, en el futuro harán falta nuevos procedimientos para fabricar sedas en mayor cantidad y con características diferentes.

La fabricación, en cantidades industriales, de la seda de araña —más resistente, tenaz y biocompatible, por no contener sericina— no es fácil. Las arañas no se han podido domesticar y criar de forma masiva, como los gusanos de seda; por su naturaleza solitaria y depredadora, es muy difícil que crezcan juntas en cautividad. Además, las telas de araña no se pueden devanar como se hace con los hilos de los capullos de seda. La ruta por la que se intenta avanzar tiene, pues, dos etapas: en la primera, se pretende identificar los genes de las arañas responsables de la fabricación de las proteínas de la seda, sintetizarlos y expresarlos en otros organismos. La segunda consiste en producir la solución proteica, hilarla y fabricar la fibra.

Siguiendo esa estrategia, se han identificado varias secuencias de aminoácidos relacionados con la composición de los hilos de seda y se han preparado genes artificiales que remedan los aspectos más característicos de las proteínas naturales. Los primeros intentos de expresar los genes en la clásica bacteria *Escherichia coli* no fueron muy satisfactorios. Entre los microorganismos candidatos, el grupo de DuPont obtuvo resultados aceptables con la levadura *Pichia pastoris* y aireó sus éxitos en la prensa. También se ha intentado expresar las proteínas de la seda en la alfalfa, en la planta del algodón y en los girasoles. Posteriormente, Nexia anunciaba que lo había conseguido a través de la leche de cabras modificadas genéticamente; a las nuevas fibras, fruto del matrimonio genético entre una araña y una cabra, las llamó Bio-steel (acerobiológico) y pregonó que su resistencia superaba los 2000 MPa.

Tres años más tarde, DuPont abandonó, aparentemente, esta línea de investigación. Nexia anunció que había fabricado fibras artificiales de seda de araña pero que su resistencia estaba bastante lejos de la pregonada anteriormente, apenas la cuarta parte. Es posible que la segunda etapa, el proceso de hilado a partir de la solución proteica, sea tan compleja como la primera. En esta dirección, nuestro grupo ha obtenido resultados prometedores al modificar el proceso de hilado tradicional mediante la deformación del hilo en medio acuoso. Los resultados se publicaron en 2009 en la revista *Macromolecules*. Por este procedimiento ya se han conseguido igualar algunas propiedades de la seda natural y se espera mejorarlas.

Las dificultades del hilado podrían obviarse si pudiera insertarse en el genoma del gusano *B. mori* los genes responsables de las magníficas propiedades de la seda de las arañas. Tras varios intentos infructuosos de investigadores japoneses, en fecha reciente, Randy Lewis, de la Universidad de Wyoming, y Malcolm Fraser, en la de Notre Dame, han conseguido criar estos gusanos mutantes. Si es así, las fibras de seda se obtendrán directamente de los gusanos, sin necesidad de purificar la solución proteica ni de hilarla artificialmente. Este procedimiento ofrece numerosas posibilidades para el futuro porque permitirá diseñar y expresar sedas con propiedades mecánicas mejoradas o con otras prestaciones. Los implantes, biosensores y las superfibras basadas en las sedas se hallan cada día más cerca de ser una realidad asequible.

El 26 de agosto de 1346, en los campos de Crécy murieron más de 12.000 soldados franceses, incluido el hermano del propio rey Felipe, Carlos II, conde de Alençon. En esta ocasión, las telarañas que llevaban en el botiquín no fueron lo suficientemente eficaces para contrarrestar las heridas producidas por las flechas inglesas, muchas de ellas impulsadas por las poderosas cuerdas de hilo de seda de los arcos largos. Las propiedades mecánicas de los hilos de seda se impusieron en esta ocasión a sus cualidades terapéuticas. Siete siglos más tarde comenzamos a asistir a la revancha de estas últimas.

PARA SABER MÁS

Telas y sedas de araña. F. Vollrath en *Investigación y Ciencia*, págs. 52-59; mayo de 1992.

Structural biological materials. Dirigido por M. Elices. Pergamon, 2000.

Silk-based biomaterials. D. L. Kaplan, G. H. Altman, F. Díaz, C. Jakuba, T. Calabro, R. Horan, J. Chen, H. Lu y J. Richmond en *Biomaterials*, vol. 4, págs. 401-416; 2003.

Finding inspiration in *Argiope trifasciata* spider silk fibers. M. Elices, J. Pérez-Rigueiro, G. R. Plaza y G. V. Guinea en *JOM*, vol. 2, págs. 60-66; 2005.

A bFGF-releasing silk/PLGA-based biohybrid scaffold for ligament/tendon tissue engineering using mesenchymal progenitor cells. S. Sahoo, S. L. Toh y J.C.H. Goh en *Biomaterials*, vol. 31, n.º 11, págs. 2990-2998; 2010.

New opportunities for an ancient material. F. G. Omenetto y D. L. Kaplan en *Science*, vol. 329, págs. 528-531; 2010.



Adam Piore, escritor y antiguo periodista de *Newsweek*, es también colaborador de *Scientific American*.



ENERGÍA NUCLEAR

PREPARARSE PARA EL CISNE NEGRO

El accidente de Fukushima ha situado en un primer plano la nueva generación de reactores nucleares. ¿Son lo bastante seguros?

Adam Piore

A MEDIO MUNDO DE DISTANCIA DE LA SINIESTRADA central nuclear de Fukushima Daiichi, en las profundidades de los pinares de Georgia, centenares de trabajadores preparan el terreno para un nuevo despertar nuclear que ellos aún creen en camino. Las excavadoras retumban sobre un suelo que ya acoge kilómetros de tuberías y avenamientos soterrados. Si los planes siguen en marcha, en algún momento del año próximo dos nuevos reactores nucleares empezarán a alzarse allí. En su caso, serán los primeros aprobados en EE.UU. en más de 25 años.

Ello supondría el pistoletazo de salida para una expansión renovada de la energía nuclear, prácticamente paralizada en EE.UU. desde que, en 1979, un accidente en la central de Three Mile Island provocase la fusión parcial del núcleo de uno de sus reactores. Sin embargo, durante los últimos años la amenaza del cambio climático ha llevado a muchos a considerar la energía nuclear como una posible alternativa libre de emisiones de carbono. Los Gobiernos de George W. Bush y de Barack Obama se han replanteado la posibilidad de construir nuevas centrales y, a día de hoy, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) estadounidense se encuentra revisando varias propuestas para levantar una veintena de reactores, los cuales habrían de sumarse a los 104 construidos decenios atrás.

Más de la mitad de ellos (incluidos los dos que se añadirán a la central de Vogtle, en Georgia) serán del tipo AP1000, los primeros de una nueva generación que incorpora dispositivos de seguridad «pasivos», concebidos para evitar desastres como el de Japón. En caso de accidente, su diseño se basa en aprovechar agentes naturales como la gravedad y las diferencias de presión para evitar el recalentamiento del combustible. Fukushima carecía de un sistema de tales características.

Hace unos meses se daba casi por seguro que los dos reactores AP1000 de Georgia obtendrían durante este año la autorización final de la NRC para su construcción. Pero después de que el descomunal seísmo de 9,0 grados y el tsunami posterior asolasen Japón en marzo y dejasen cuatro de los núcleos de la central de Fukushima desprovistos de refrigerante, la perspectiva de una catástrofe nuclear ha vuelto a ocupar un lugar destacado entre la opinión pública. En pocas semanas, el porcentaje de estadounidenses a favor de la construcción de los nuevos reactores descendió del 49 al 41 por ciento, una

JIM R. BOUNDS, BLOOMBERG, GETTY IMAGES (*central de Shearon Harris, New Hill, Carolina del Norte*)

EN SÍNTESIS

Las compañías eléctricas han propuesto 22 nuevos reactores en EE.UU. La Comisión Reguladora Nuclear está sometiendo los nuevos diseños a examen para determinar si podrían afrontar amenazas extremas.

En caso de accidente, los dispositivos de seguridad de los nuevos modelos funcionarían incluso en ausencia total de electricidad y sin necesidad de intervención humana.

Incluso si las centrales más avanzadas lograsen soportar terremotos y tsunamis de gran magnitud o el impacto de un avión, las empresas aún deben hallar un compromiso entre costes y seguridad.

muestra de la desconfianza en la tecnología nuclear a pesar de las repetidas garantías sobre unos riesgos infinitesimales y una protección robusta. En este sentido, la catástrofe de Fukushima nos ha ofrecido una verdadera lección sobre los límites de la estimación de riesgos.

A pesar de la planificación, la energía nuclear jamás quedará exenta de un acontecimiento de tipo cisne negro, la metáfora popularizada por Nassim Nicholas Taleb para referirse a los sucesos altamente improbables pero cuyas repercusiones son enormes. Un acontecimiento excepcional —y, sobre todo, uno que jamás se haya producido— resulta difícil de pronosticar, caro de prevenir y fácil de descartar con las estadísticas en la mano. Pero concluir que algo acontece una vez cada 10.000 años no implica que no pueda suceder mañana. Y, a lo largo de los 40 años de vida típicos de una central, también las suposiciones de ese estilo pueden cambiar. Así ocurrió el 11 de septiembre de 2001, en agosto de 2005 (tras la llegada del huracán Katrina) y el pasado mes de marzo.

La lista de amenazas de tipo cisne negro exhibe una diversidad ominosa: los reactores nucleares y sus piscinas de combustible usado constituyen un objetivo evidente para un terrorista a los mandos de un avión secuestrado; una presa cercana a un reactor siempre puede reventar; existen centrales ubicadas en las cercanías de una falla sísmica y en zonas costeras expuestas a tsunamis o huracanes. Cualquier situación como las anteriores podría provocar una catástrofe similar a las que sufrieron las centrales de Three Mile Island y Fukushima: un fallo en el circuito de refrigeración, el recalentamiento y fusión de las barras de combustible y la liberación a la atmósfera de material radiactivo. (En Chernóbil, fue una explosión lo que encendió el núcleo.)

Prepararse para tales escenarios resulta complicado aun sin límites presupuestarios a los que atenerse. Las compañías han intentado reducir los elevados costes iniciales que conlleva erigir un reactor; pero, incluso optimizando los gastos de licencia y construcción, hoy en día edificar una central nuclear cuesta por megavatio casi el doble que una de carbón y cinco veces más que una de gas natural. La diferencia pueden enjugarla unos costes de explotación menores (el carbón cuesta casi el cuádruple que el combustible nuclear; el gas natural, diez veces más), pero el ahorro solo se materializa si la central se mantiene funcionando a alta capacidad durante muchos años. En las décadas de los setenta y ochenta, las paradas de mantenimiento y seguridad arruinaron los beneficios de explotación de algunas centrales. Con miras a una mayor competitividad, se ha intentado rebajar los costes de construcción y reducir el número de paradas necesarias mediante sistemas más sencillos y fiables, sin comprometer con ello los márgenes de seguridad.

Desde luego, construir un reactor inmune a cualquier tipo de amenaza resulta imposible, por más que se encierre entre colosales muros de contención, se sepulte bajo una bóveda estanca y se contrate a un ejército de adivinos para predecir el futuro. Sin duda, los diseñadores del AP1000 han intentado sortear con éxito una miríada de restricciones de naturaleza física, económica y de seguridad; pero, con todo, su resultado no puede ser sino una solución de compromiso. Y, en la estela de Fukushima, la pregunta más acuciante para la opinión pública es la relativa a la seguridad.

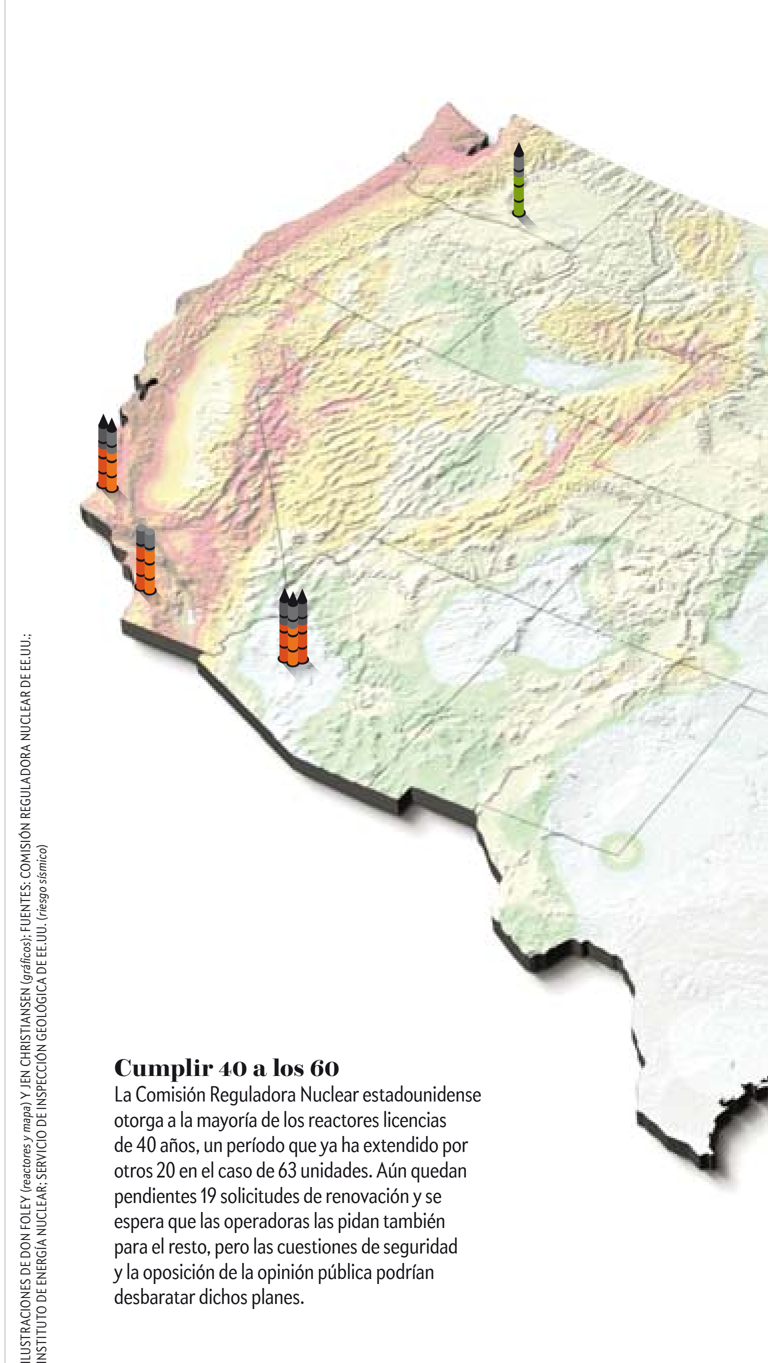
DEFENSAS PASIVAS

Los AP1000, al igual que el resto de los reactores considerados de generación III+ («Gen III+») por la NRC, fueron diseñados te-

LA SITUACIÓN EN EE.UU.

Un parque a examen

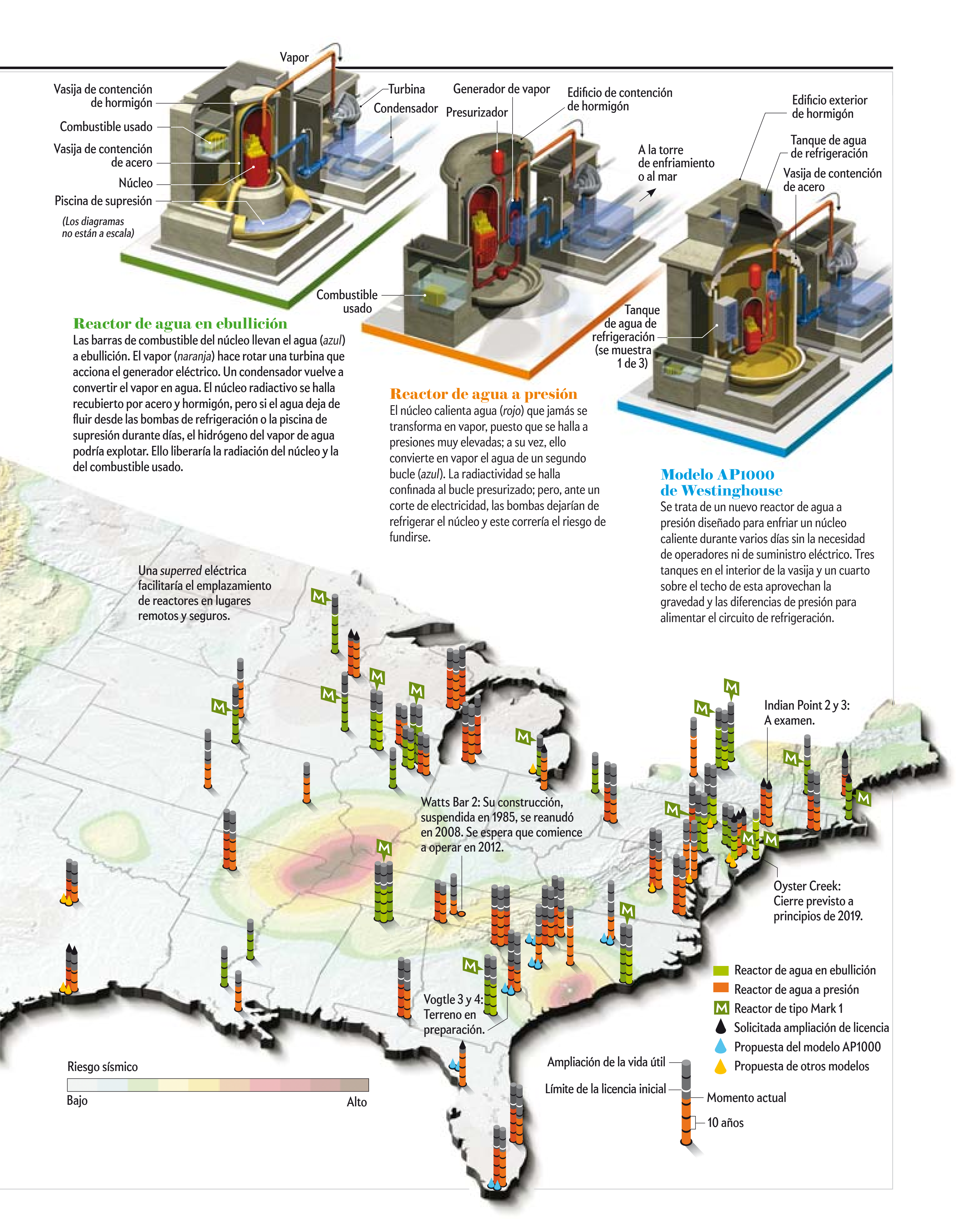
La energía nuclear atiende el 20 por ciento del suministro eléctrico de EE.UU. La mayoría de los 104 reactores actualmente en servicio llevan 30 años o más funcionando y, según los críticos, puede que no soportasen un terremoto devastador. Algunas centrales se encuentran en la proximidad de fallas sísmicas. Los reactores existentes son de agua en ebullición (*verde*) o de agua a presión (*naranja*); 23 de ellos poseen la misma estructura de contención (de tipo Mark 1, de General Electric) que los reactores de Fukushima Daiichi. Se han propuesto 22 nuevas unidades con un diseño más seguro; más de la mitad serían del modelo AP1000 de Westinghouse (*azul*).



Cumplir 40 a los 60

La Comisión Reguladora Nuclear estadounidense otorga a la mayoría de los reactores licencias de 40 años, un período que ya ha extendido por otros 20 en el caso de 63 unidades. Aún quedan pendientes 19 solicitudes de renovación y se espera que las operadoras las pidan también para el resto, pero las cuestiones de seguridad y la oposición de la opinión pública podrían desbaratar dichos planes.

ILUSTRACIONES DE DON FOLEY (*reactores y mapa*) Y JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*); FUENTES: COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE EE.UU.; INSTITUTO DE ENERGÍA NUCLEAR; SERVICIO DE INSPECCIÓN GEOLÓGICA DE EE.UU. (*riesgo sísmico*)


Vapor
Vasija de contención de hormigón
Combustible usado
Vasija de contención de acero
Núcleo
Piscina de supresión
(Los diagramas no están a escala)
Turbina
Condensador
Generador de vapor
Presurizador
Edificio de contención de hormigón
A la torre de enfriamiento o al mar
Combustible usado
Edificio exterior de hormigón
Tanque de agua de refrigeración
Vasija de contención de acero
Tanque de agua de refrigeración (se muestra 1 de 3)
Reactor de agua en ebullición
Las barras de combustible del núcleo llevan el agua (azul) a ebullición. El vapor (naranja) hace rotar una turbina que acciona el generador eléctrico. Un condensador vuelve a convertir el vapor en agua. El núcleo radiactivo se halla recubierto por acero y hormigón, pero si el agua deja de fluir desde las bombas de refrigeración o la piscina de supresión durante días, el hidrógeno del vapor de agua podría explotar. Ello liberaría la radiación del núcleo y la del combustible usado.
Reactor de agua a presión
El núcleo calienta agua (rojo) que jamás se transforma en vapor, puesto que se halla a presiones muy elevadas; a su vez, ello convierte en vapor el agua de un segundo bucle (azul). La radiactividad se halla confinada al bucle presurizado; pero, ante un corte de electricidad, las bombas dejarían de refrigerar el núcleo y este correría el riesgo de fundirse.
Modelo AP1000 de Westinghouse
Se trata de un nuevo reactor de agua a presión diseñado para enfriar un núcleo caliente durante varios días sin la necesidad de operadores ni de suministro eléctrico. Tres tanques en el interior de la vasija y un cuarto sobre el techo de esta aprovechan la gravedad y las diferencias de presión para alimentar el circuito de refrigeración.
Una superred eléctrica facilitaría el emplazamiento de reactores en lugares remotos y seguros.
Indian Point 2 y 3: A examen.
Watts Bar 2: Su construcción, suspendida en 1985, se reanudó en 2008. Se espera que comience a operar en 2012.
Oyster Creek: Cierre previsto a principios de 2019.
Vogtle 3 y 4: Terreno en preparación.
Reactor de agua en ebullición
Reactor de agua a presión
Reactor de tipo Mark 1
Solicitada ampliación de licencia
Propuesta del modelo AP1000
Propuesta de otros modelos
Ampliación de la vida útil
Límite de la licencia inicial
Momento actual
10 años
Riesgo sísmico
Bajo
Alto

La seguridad de nuestras centrales nucleares

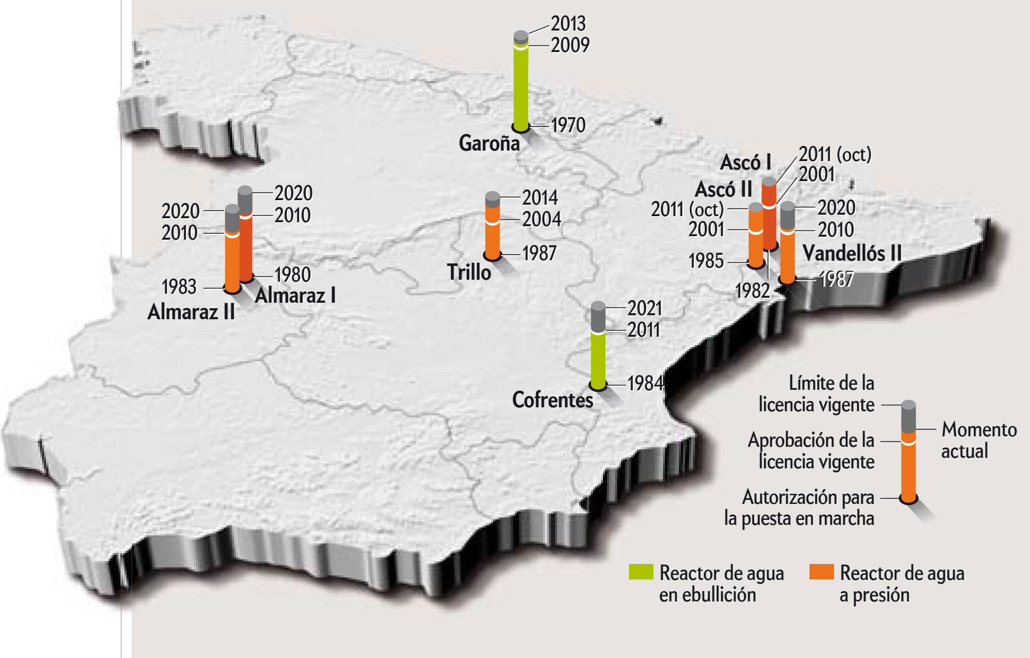
El legado de Three Mile Island y las consecuencias de Fukushima

FRANCESC REVENTÓS

En España contamos con centrales de dos tipos: de agua a presión y de agua en ebullición. Entre las primeras se encuentran las plantas de Almaraz, Ascó, Vandellós-II y Trillo; entre las segundas, Santa María de Garoña y Cofrentes. Almaraz y Ascó poseen dos reactores cada una; todas las demás cuentan con un solo reactor. Garoña fue la primera central que entró en operación, en 1971; el resto lo hizo entre 1983 y 1988. El diseño de las centrales españolas es de factura estadounidense y alemana: Garoña y Cofrentes corrieron a cargo de General Electric, Trillo fue diseñada por KWU-Siemens y el resto fueron proyectadas por Westinghouse. La industria de ambos países cuenta con una tradición sobresaliente en el ámbito de ingeniería, y los dos han destacado por su rigor y su capacidad para integrar seguridad e ingeniería de forma pionera durante las décadas anteriores a las que vieron el desarrollo de nuestras centrales.

El riesgo de una central nuclear se halla en los productos de fisión. Las radiaciones que emanan de ellos son ionizantes y, por tanto, nocivas a partir de ciertas dosis [*Véase* «Radiaciones ionizantes», por G. Cortés; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2011]. En condiciones normales, estos productos se encuentran confinados en las propias barras de uranio y no causan problema alguno. La primera barrera de seguridad que evita que la radiactividad escape al exterior consiste en las vainas de circonio que recubren las barras de combustible nuclear. Aun después de una parada del reactor, el combustible continúa desprendiendo calor, razón por la que siempre debe someterse a un proceso de refrigeración. Si se enfría de la manera adecuada, la primera barrera de seguridad ya garantiza un nivel de seguridad muy elevado, motivo por el que una de las medidas esenciales en una central es, entre otras, mantener el enfriamiento del núcleo. Para ello se diseñan sistemas de inyección o de recirculación de agua. Si estos sistemas requieren elementos activos para su funcionamiento, como bombas eléctricas, el diseño prevé también una alimentación eléctrica estable. Existen asimismo sistemas de refrigeración «pasivos», los cuales no requieren electricidad ni intervención humana. Si bien las centrales actuales disponen de algún elemento pasivo, la mayoría de sus sistemas de seguridad son activos.

A los mecanismos descritos hay que sumar los protocolos de emergencia, los cuales dictan las medidas que han de tomarse desde la sala de control. La ingeniería de seguridad se encarga de diseñar los sistemas correspondientes y de establecer los procedimientos en caso de accidente. Al igual que se ha hablado de la primera barrera de seguridad y de su ingeniería asociada, existen una segunda barrera (la vasija de contención del reactor) y una tercera (el edificio exterior), cada una con sus sistemas de seguridad y sus procedimientos respectivos.



El nacimiento de la ingeniería nuclear en España se vio arropado en su día por dos grandes principios. El primero de ellos fue normativo; el segundo se refería a la asimilación de la tecnología por parte de la ingeniería española. Desde sus inicios, la regulación española obligó al responsable de la planta a que el diseño de

niendo en mente catástrofes diferentes a la de Japón. En 1979, la fusión parcial del núcleo en el accidente de Three Mile Island no se debió a causas naturales, sino a un error humano. En cuestión de meses, los ingenieros se lanzaron a proyectar mejoras que simplificasen los protocolos de seguridad e incorporasen mecanismos de refrigeración de refuerzo sin necesidad de la intervención humana. El resultado fueron los reactores Gen III+.

En el interior de un AP1000, el agua de refrigeración sigue un circuito cerrado. Al pasar por encima del núcleo absorbe calor pero no se vaporiza, ya que se mantiene a una presión elevada. A su vez, las tuberías se enfrían con el agua de un depósito secundario. Si falla la alimentación de las bombas, el reactor dispone de baterías de apoyo. Y si estas dejan de funcionar, entran en juego los agentes naturales: el agua fluye desde tres tanques de emergencia instalados en el interior de la vasija de contención de acero que envuelve al núcleo.

Un apagón abre las válvulas y, gracias a las diferencias de presión y temperatura entre el núcleo y los tanques, el agua escapa de estos y circula para enfriar las barras de combustible. Si es necesario, se emplea el agua de un cuarto tanque, situado en el techo del edifico exterior de hormigón. Esa agua se vierte sobre la vasija de contención y, al evaporarse, se lleva calor consigo. En el interior de la vasija, el vapor que emana del núcleo llega al techo enfriado de la bóveda, se condensa y cae de nue-

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; FUENTE: CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

la central cumpliese la reglamentación del país de origen, lo que supuso unos comienzos de gran eficacia en lo referente a la seguridad de las plantas en nuestro país. Por otro lado, los contratos para completar el diseño de las centrales permitieron la importación «cualificada» o asimilación de tecnología. Gracias a ellos se sustituía el antiguo contrato de «llaves en mano» por otro mucho más eficaz, ya que permitía a las empresas españolas compartir las tareas de diseño con expertos del país de origen. Como consecuencia, el resultado no se limitó a la construcción de centrales nucleares, sino que el proceso contribuyó de manera significativa al desarrollo de la ingeniería española. Puede afirmarse que, con la puesta en funcionamiento de las centrales de Trillo y Vandellós-II al final de la década de los ochenta, la ingeniería española adquirió la capacidad de velar por la seguridad de las plantas del país e incluso inició una trayectoria propia. Aunque ese impulso no llegó a concretarse en el diseño de nuevas plantas con una mayor participación española debido a la moratoria nuclear, sí dio pie a iniciativas y desarrollos de gran relevancia. Muchos de ellos, iniciados en paralelo con el diseño de las plantas, se centraron en materia de seguridad.

El accidente en la central estadounidense de Three Mile Island en 1979 supuso un auténtico revulsivo para la industria nuclear occidental. La cadena de fallos humanos que se sucedieron hasta provocar el daño del núcleo del reactor sorprendió a la comunidad de analistas: costaba creerlo, pero fue así. La única salida viable requería un importante esfuerzo de ingeniería, una autocrítica seria y un nuevo planteamiento de los protocolos de operación ante una situación de emergencia. Esos desarrollos afianzaron la madurez de la ingeniería nuclear española y sirvieron para reforzar la seguridad de las centrales. La mayoría de ellas comenzaron a operar con las mejoras ya probadas y aplicadas, y las más antiguas modificaron sus procedimientos para incorporar los últimos logros en materia de seguridad.

El incentivo del accidente de Three Mile Island llegó más lejos. No solo se desarrollaron sistemas para las centrales ya existentes, sino que se llevó a cabo un análisis más profundo de sus vulnerabilidades, lo que se tradujo en requisitos adicionales para las plantas futuras. También se consolidó el uso de la estadística para cuantificar el riesgo y, de esta manera, objetivar qué modificaciones en el diseño resultaban prioritarias de cara a evitar accidentes.



Las centrales españolas generan en torno al 20 por ciento de la energía eléctrica que se consume en nuestro país.

La lección de Three Mile Island se tradujo, por tanto, en el diseño de nuevos mecanismos de seguridad. Los modelos correspondientes ya se han aprobado en varios países, y la construcción de algunas plantas que los incorporan ya ha comenzado. Se trata de centrales que incluyen sistemas de seguridad pasivos, por lo que pueden hacer frente a una emergencia sin necesidad de intervención humana ni electricidad. La industria española ha participado en la definición de requisitos —en calidad de explotador de la tecnología— al tiempo que ha colaborado en el desarrollo y la fabricación de algunos equipos. Algunos centros y grupos universitarios españoles han participado en proyectos de I+D relacionados, tales como el proyecto europeo «Mejoras en la Tecnología de Sistemas de Seguridad Pasivos», en el que cooperaron el CIEMAT, la Universidad Politécnica de Valencia y la de Cataluña.

Aún es pronto para decidir si los acontecimientos de Fukushima también traerán cambios en materia de seguridad. La precipitación es enemiga de la ciencia. Hoy podemos afirmar que la estela de Three Mile Island se caracterizó por el sosiego y la capacidad de autocrítica, que es lo que deberíamos pedir en estos momentos. El accidente de Fukushima revistió gran seriedad y como tal debe ser tratado. También con calma, deberíamos ser capaces de apreciar los resultados objetivamente positivos que han sido el fruto de los análisis y desarrollos efectuados desde 1979. Fukushima ha sorprendido a la comunidad de expertos en materia de seguridad. Ahora corresponde estudiar en detalle todos los sistemas, procedimientos y parámetros de la planta para obtener una reconstrucción detallada de los acontecimientos que condujeron a la catástrofe. Alguna lección aprenderemos, y su aplicabilidad puede ir más allá de Fukushima.

Si, finalmente, todo apunta a que la causa del problema puede resumirse en un solo parámetro, tampoco a ello deberíamos restar importancia. Estimar un límite y un margen de seguridad implica una tarea de enorme complejidad, más aún cuando hablamos de un fenómeno natural. ¿Cuál es el máximo registro histórico para un fenómeno como un seísmo o un tsunami? ¿Seguiremos hablando del mismo modo de máximos históricos después de Fukushima?

La confianza en el colectivo analista y en su autocrítica resulta indispensable para una salida positiva y una explicación satisfactoria. Y, aunque intuitivo y asistemático, el primer análisis se antoja esperanzador.

Francesc Reventós es profesor en el departamento de física e ingeniería nuclear de la Universidad Politécnica de Cataluña.

vo sobre el núcleo. El cuarto tanque contiene más de tres millones de litros de agua, lo suficiente para tres días, y como explica Howard Bruschi, antiguo consejero delegado de tecnología de Westinghouse (la constructora del AP1000), puede rellenarse con mangueras. Además, el edificio se halla dotado de respiraderos que introducen aire frío desde el exterior para refrigerar la vasija de contención.

La ventaja de todos esos dispositivos de apoyo reside en que no requieren ni operarios ni electricidad. Sus defensores alegan que, de haber contado con un sistema semejante, el apagón que sufrió Fukushima —que afectó tanto a la red eléctrica como a los generadores de emergencia— no habría ocasionado problema alguno. Aunque esos mecanismos de seguridad no funcionen durante más que algunos días, ese tiempo alcanza para restablecer el suministro eléctrico.

Otra cuestión es si todo lo anterior basta para evitar una fusión del núcleo y la emisión de radiación al exterior. Los partidarios de los diseños Gen III+ sostienen que estos resultan al menos diez veces más seguros que cualquiera de los reactores construidos hasta ahora en EE.UU. Otros se muestran más cautelosos. Hussein S. Khalil, director de la división de ingeniería nuclear del Laboratorio Nacional Argonne, no llega tan lejos: «Es justo reconocer que las centrales Gen III+ consiguen con medios naturales un grado de seguridad equiparable al que han



Secuelas: El accidente en la central japonesa de Fukushima Daiichi ha levantado dudas sobre la seguridad de los reactores de vieja generación aún en funcionamiento.

logrado las mejoras introducidas en las centrales existentes». Y Edwin Lyman, detractor de la industria nuclear y miembro senior de la Unión de Científicos Preocupados, no admite tan siquiera eso. Ha cuestionado algunas de las opciones de diseño orientadas a reducir costes que Westinghouse adoptó en su AP1000 y General Electric en su ESBWR (otro modelo). La principal preocupación de Lyman se centra en la resistencia de la vasija de contención de acero y en la del edificio exterior de hormigón del AP1000. En Fukushima, a la vez que se rociaba con agua la estructura de contención para enfriar las barras de combustible, los ingenieros no dejaban de mirar con preocupación al hidrógeno, potencialmente explosivo, y al vapor de agua a presión.

Según Lyman, la vasija de contención del AP1000 carece de unos márgenes de seguridad suficientes. Un patrón que él usa para medir la contención de un reactor —y, por tanto, su capacidad para resistir los aumentos de presión— es el cociente entre el volumen de contención y la potencia térmica del reactor. Para el AP600 de Westinghouse, un predecesor cuya fabricación cesó porque generaba una potencia demasiado escasa para que resultase rentable, ese cociente rondaba los 25 metros cúbicos por megavatio, similar al de la mayoría de los reactores de agua presurizada en funcionamiento. Pero cuando Westinghouse aumentó la potencia del AP1000 hasta los 1100 megavatios, no amplió de manera proporcional la capacidad de contención del reactor, cuyo cociente se redujo a 17 metros cúbicos por megavatio. Lyman hace hincapié en que las vasijas y los edificios de contención «son caros».

Bruschi alega que el AP1000 cumple de sobra con los límites impuestos por la NRC, y añade que la refrigeración extra que proporcionan los sistemas pasivos reduciría, con toda probabilidad, la presión durante un accidente grave, algo en lo que coinciden varios ingenieros independientes. A Lyman, por su parte, le preocupan los aumentos de presión que superen lo que la mayoría de los ingenieros nucleares pueda prever.

Lyman se siente más tranquilo con el diseño del Areva EPR, un modelo en el que participaron eléctricas francesas, alemanas y organismos reguladores europeos, y que ahora se encuentra bajo examen por parte de la NRC. En lugar de sistemas de apoyo pasivos, el Areva dispone de cuatro generadores diésel primarios y dos secundarios, alojados en edificios estancos independientes y emplazados en lados opuestos de la central. Según Marty Parece, vicepresidente de tecnología del Grupo Financiero de Reactores y Servicios de Areva, ello hace sumamente improbable que fallen todos a la vez. E incluso si los generadores de emergencia dejasen de funcionar, el EPR posee un edificio de contención de muros dobles más gruesos y un colector de núcleo, una estructura que «atrapa» el combustible fundido, lo retiene y lo cubre con un sistema de abastecimiento de agua por gravedad. El colector evita que el núcleo radiactivo fundido escape a través del suelo.

SEGURIDAD FRENTE A COSTES

Los ingenieros nucleares no se pueden dar el lujo de prevenir todas y cada una de las catástrofes posibles. Deben tener presentes múltiples escenarios, pero catástrofes diferentes requieren medidas de seguridad distintas y, en ocasiones, algunas van en detrimento de otras. La crítica más incisiva al sistema de seguridad del AP1000 podría acabar siendo la esgrimida por John Ma, ingeniero senior de estructuras de la NRC. En 2009, la NRC introdujo una modificación en las regulaciones de seguridad relacionada con los sucesos del 11 de septiembre, al disponer que todas las centrales debían resistir el impacto directo de un avión. Para cumplir con el nuevo requisito, Westinghouse recubrió los muros de hormigón del edificio con placas de acero.

Ma, miembro de la NRC desde su fundación en 1974, presentó el año pasado su primer disenso «por falta de acuerdo» después de que la comisión aprobase el diseño del AP1000. Sostiene que algunas zonas de la capa de acero son tan frágiles que el impacto de un avión o el de un proyectil impulsado por una tormenta podrían hacer añicos el muro. Un equipo de expertos contratados por Westinghouse discrepó. También lo hicieron varios consultores para el Comité Asesor de Salvaguardas en Reactores de la NRC, quienes recomendaron la aprobación del diseño.

Otros modelos más innovadores parecen ofrecer unos márgenes de seguridad más amplios. Los reactores de lecho de guijarros, un diseño Gen III+ aún en desarrollo, emplean gas en lu-

REUTERS

gar de agua para enfriar el combustible y usan esferas de grafito del tamaño de pelotas de tenis en las que hay incrustados miles de granos diminutos de material radiactivo. El grafito frena el ritmo de fisión, lo que disminuye la probabilidad de que el núcleo se recaliente, y el gas refrigerante no explota con tanta facilidad como el hidrógeno del vapor de agua. Y quizá mereciese la pena considerar también los pequeños reactores modulares, un diseño menos potente pero mucho más barato que los reactores de gran tamaño, ya que generan menos calor y resultan más sencillos de refrigerar.

La mayoría de los expertos nucleares parecen satisfechos con el compromiso entre seguridad y costes alcanzado por Westinghouse; opinan que su estructura de contención brinda una protección suficiente frente a la mayoría de los accidentes. Al fin y al cabo, es responsabilidad de los ingenieros decidir dónde está el punto de equilibrio entre seguridad y coste.

FALTA DE IMAGINACIÓN

Pero Fukushima plantea preguntas que trascienden las preferencias por un diseño u otro. Una causa del desastre fue la falta de imaginación, algo a lo que cualquier diseñador u organismo regulador es vulnerable. La central se construyó para soportar terremotos de magnitud 8,2; uno de 9,0 se encontraba dentro de los márgenes de seguridad. Pero, si bien el diseño era a prueba de olas de 5,7 metros, las que abatieron la central superaron los 14 metros. Olas de esa altura no carecen de precedentes: según Thomas Brocher, director del Centro de Ciencias Sismológicas del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU., un terremoto y tsunami de magnitudes similares ya sacudieron la zona en el año 869. Cuando los proyectistas cometen tales «errores de diseño» —sea en un reactor, un puente o un rascacielos— las consecuencias son imprevisibles.

Un error de cálculo de ese calibre parece menos probable en EE.UU. Según Brian Anderson, portavoz de la NRC, a los constructores se les exige demostrar que sus plantas pueden soportar la peor inundación, tsunami o terremoto del que existan registros, a lo que han de añadir un margen de seguridad. Como explica Bozidar Stojadinovic, experto en ingeniería sísmica de la Universidad de California en Berkeley y consultor de la NRC, la norma se basa en un modelo que evalúa el mayor terremoto en la región durante los últimos 10.000 años y el margen de error suele calcularse entre 1,5 y 2 veces esa magnitud.

Con todo, solo resulta posible tomar medidas frente a aquellos acontecimientos que se pueden prever. Los expertos descubren constantemente nuevos riesgos sísmicos. Hace pocos decenios, la probabilidad de que un terremoto o un tsunami se abatiera sobre la costa noroccidental del Pacífico se consideraba remota. Más tarde, se dató la extinción del cedro rojo en la región hacia 1700, lo que sugería que aquel año habría tenido lugar un terremoto, un hecho que confirmaron los registros de un tsunami acontecido en Japón. En retrospectiva, los geólogos hallaron que un seísmo de magnitud 9,0 había sacudido la región desde la isla de Vancouver hasta el norte de California. El hallazgo cambió para siempre las regulaciones de construcción de edificios en la región. Con anterioridad se habían levantado dos centrales nucleares (en Oregón y en California septentrional), aunque ya se habían desmantelado.

En la costa atlántica los terremotos ocurren con tan poca frecuencia que su investigación se ha considerado menos urgente. Con todo, el reactor de Indian Point, al norte de la ciudad de Nueva York, se halla a menos de 80 kilómetros de casi el seis por ciento de la población del país, una concentración mayor que la de cualquier otra central de EE.UU. Según John E. Ebel, sismólogo del Boston College, los expertos no coinciden sobre cuál de las fallas de la zona tiene más posibilidades de provocar un seísmo ni sobre cómo estas podrían interactuar. Un estudio de 2008 halló que un número de pequeñas fallas locales que se creían inactivas podrían contribuir a un movimiento sísmico de importancia.

Fukushima muestra la necesidad de un «nuevo paradigma», afirma Naj Meshkati, profesor de ingeniería en la Universidad de California del Sur y experto en los efectos sísmicos sobre las centrales nucleares. «Nuestras hipótesis se han basado en posibilidades improbables», sostiene, «pero los ingenieros no son tan buenos a la hora de prevenir catástrofes que no solo son del todo remotas, sino que no han sucedido jamás». Tales incertidumbres impiden saber si un margen de error del doble que el considerado en el diseño basta o no.

Por otra parte, ninguna estructura de factura humana es cien por cien antisísmica, afirma Michael Corradini, miembro del comité asesor de la NRC para salvaguardas de reactores. La pregunta, añade, es qué clase de eventualidades estamos dispuestos a considerar en nuestros diseños y si la sociedad acepta ese factor de seguridad.

¿Cuán seguro es un diseño «muy seguro»? En lo que se refiere a la energía nuclear, una respuesta reflexiva ha de tomar en consideración las alternativas y el tipo de riesgo con el que podemos convivir. Según el Departamento de Energía de EE.UU., el carbón produce la mitad de la electricidad del país y el 80 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono; las centrales nucleares generan el 20 por ciento de la energía y no emiten gases de efecto invernadero. Un estudio del año 2000 encargado por el Grupo de Trabajo por un Aire Limpio vinculó la polución que emanaba de tan solo dos centrales de carbón del noreste de EE.UU. con decenas de miles de ataques de asma, cientos de miles de casos de enfermedades en las vías respiratorias superiores y 70 muertes al año. La combustión del gas natural es más limpia, pero cada vez existen más pruebas de que algunos métodos de extracción plantean sus propios riesgos ecológicos y sanitarios.

La incertidumbre generada tras el accidente en Japón quizá desbarate la construcción de algunos reactores nuevos, pero los imperativos del calentamiento global y nuestras necesidades energéticas sugieren que el resurgir de la energía nuclear continuará su camino. Stephen Chu, secretario de Energía de EE.UU., dio su apoyo al AP1000 en febrero de 2010, después de que el presidente Obama anunciara garantías para un anticipo condicional por 8300 millones de dólares. Además, el historial de la energía nuclear habla a favor de sus partidarios. Pese a todo el pánico desatado tras el accidente de Three Mile Island, el suceso no se cobró ni una sola víctima mortal. Los historiales, sin embargo, no sirven para dar cuenta de algo que nunca antes había ocurrido pero que quizá suceda algún día.

PARA SABER MÁS

Nuclear power in a warming world. Lisbeth Gronlund et al. Unión de Científicos Preocupados, diciembre de 2007. Disponible en **www.ucsusa.org**
The future of nuclear power: An interdisciplinary MIT study. Instituto de Tecnología de Massachusetts, 2009. Disponible en **web.mit.edu/nuclearpower**
Asociación Nuclear Mundial: **www.world-nuclear.org**
Comisión Reguladora Nuclear de EE.UU.: **www.nrc.org**
En España, Consejo de Seguridad Nuclear: **www.csn.es**

por Nina Bai

Moradas en los árboles

Los nidos ofrecen información sobre la historia natural, el cambio climático y los hábitos de sus ocupantes

A base de ramitas y hierbas, lana de oveja y pelos de caballo, las aves tejen su mundo para formar nidos. Así, los hogares que después abandonan ofrecen pistas acerca de su vida y su entorno, de modo parecido a como los yacimientos arqueológicos nos aportan información sobre la historia humana.

Se ha utilizado la diversidad arquitectónica de los nidos para desentrañar la compleja genealogía de los pájaros cantores de Sudamérica; los restos de las presas hallados en los nidos de águilas calvas han revelado los hábitos alimentarios de estas aves; y la datación mediante carbono de las plumas y las heces en nidos antiguos de halcones ha proporcionado datos sobre la época en que se retiraron los escudos de hielo de Groenlandia. Las investigaciones actuales, entre las que se cuenta un artículo publicado a principios de año en la revista *Science*, demuestran que las aves utilizan la decoración de los nidos para competir por la pareja y comunicarse entre sí con más frecuencia de lo que se pensaba.

La recolección de nidos era una distracción popular entre los adolescentes del siglo XIX. En la actualidad, está prohibida en gran parte del planeta. Las imágenes que se acompañan proceden de *Nests: Fifty nests and the birds that built them* («Cincuenta nidos y las aves que los construyeron») (Chronicle Books, 2011), libro en el que la fotógrafa Sharon Beals presenta varios nidos exhibidos en museos. Lloyd Kiff, antiguo director de la Fundación Occidental de Zoología de Vertebrados, en Los Ángeles (que posee la mayor colección del mundo, con 18.000 ejemplares), opina que los nidos siguen siendo un recurso científico apenas explotado.

Notas de campo: 1 Gorrión mexicano (*Carpodacus mexicanus*; Arizona, 1965); cordel, papel, alambre plastificado. 2 Pinzón terrestre pequeño (*Geospiza fuliginosa*; islas Galápagos, 1906); hierba, ramitas, algodón silvestre. 3 Baloncillo (*Auriparus flaviceps*; México, 1961); ramitas espinosas, telaraña. 4 Zorzalito overo (*Catharus dryas*; México, 1968); musgo, liquen, hojas. 5 Arrendajo gris (*Perisoreus canadensis*; Colorado, 1938); ramitas, capullos, liquen, corteza, pelos, plumas. 6 Mirlo acuático norteamericano (*Cinclus mexicanus*; California, 1951); musgo, hierba, hojas, corteza. 7 Chipe de Tolmie (*Oporornis tolmiei*; California, 1920); hierba basta. 8 Tangara aliblanca migratoria (*Piranga ludoviciana*; Nevada, 1934); ramitas, corteza, agujas de pino, pelo animal. 9 Ratona común (*Troglodytes aedon*; California, 1974); ramitas, hierba fina, esqueletos de pollos pequeños abandonados.


1


4


7

FOTOGRAFÍAS DE SHARON BEALS


2
3
5
6
8
9

por Antonio García Belmar



Antonio García Belmar es profesor de historia de la ciencia en la Universidad de Alicante.

La química y sus (r)evoluciones

Historia y memoria de una ciencia mixta

No hay revolución en la ciencia que haya sobrevivido a la investigación histórica. Tras décadas de estudios dedicados a la revolución científica de los siglos XVI y XVII, uno de sus principales especialistas, Steven Shapin, comenzaba su popular obra de síntesis sobre este período afirmando que «la revolución científica nunca existió; y este libro trata sobre ella». A una conclusión similar podría llegarse a la vista de los cientos de trabajos que en el último lustro han explorado, matizado y difuminado los trazos gruesos con los que se ha dibujado la historia revolucionaria y heroica del nacimiento de la química moderna, a finales del siglo XVIII.

Memorias de una revolución

Como si de la narración de los orígenes de una nación se tratara, el mito fundacional de la química se ha construido a partir de un héroe, de acontecimientos cruciales, de objetos de culto y hasta de episodios trágicos. Según esta narración de los hechos, no sería hasta finales del siglo XVIII cuando la química habría logrado desprenderse de los restos de su oscuro pasado alquímico, sus teorías especulativas y sus prácticas al servicio de las artes aplicadas para emerger como una ciencia moderna e independiente. Y lo habría hecho de la mano de un genio revolucionario, Antoine Lavoisier, que sacrificó todo en esta empresa, hasta su vida.

Guiado por una intuición, «nada se pierde, nada se gana», y armado con un instrumento de medida, la balanza, Lavoisier habría removido los fundamentos especulativos de la química premoderna asentando en su lugar sólidas teorías científicas basadas en experimentos rigurosos y datos cuantitativos. Ejemplo emblemático de este nuevo modo de pensar habría sido la nueva teoría de la combustión, que atribuía fenómenos tan dispares como la combustión, la oxidación o la respiración, a la acción química del oxígeno, el sorprendente fluido elástico que él mismo había descubierto. Representativas del nuevo modo de experimentar habrían sido también las cruciales operaciones de análisis y síntesis del agua, con las que, además de desterrar para siempre la milenaria teoría de los cuatro principios aristotélicos, Lavoisier habría abierto el camino para una nueva definición de elemento, basada en criterios estrictamente experimentales, y, con ella, a un nuevo lenguaje sistemático y preciso en el que las sustancias pasaban a ser nombradas de acuerdo con su principal rasgo distintivo, la composición.



Estatua del escultor L. E. Barrias, erigida en la plaza de la Madeleine de París, en 1900, y destruida en 1943 durante la ocupación nazi. En ella se podía leer «*Antoine Laurent Lavoisier 1743-1794, fondateur de la chimie moderne*».

Una mente genial y creadora, en definitiva, que de no haber sido trágica e injustamente cercenada por los que gritaron que la «revolución no necesitaba a los sabios» habría llegado, aseguran algunos, a adelantar en decenios pasos fundamentales de la química actual, como la teoría atómica o las estructuras moleculares.

Las historiografías nacionales se han encargado de completar ese retrato del origen y significado de la revolución química con la narración de los modos en que la buena nueva llegó y fue recibida por los químicos de la periferia, sin desaprovechar la ocasión para distinguir entre las mentes abiertas que comprendieron y abrazaron las nuevas teorías, métodos y lenguaje venidos de la ciudad de las luces y aquellos que, movidos por oscuros intereses ideológicos, religiosos o corporativos, prefirieron permanecer sumidos en las tinieblas.

Una historiografía «contrarrevolucionaria»

No ha quedado aspecto de esta historia heroica, esbozada por los propios protagonistas y consolidada por los químicos historiadores del siglo XIX, que no haya sido objeto de una severa revisión por los historiadores de la química en las últimas décadas.

Se comenzó por cuestionar qué era lo realmente revolucionario en la revolución. Las respuestas se multiplicaron: la teoría de la combustión, la noción de elemento y el concepto de composición, la teoría de la acidez, el principio de conservación de la masa y el uso de la balanza, la reforma del lenguaje... La proliferación de respuestas tuvo como primer efecto un desdibujamiento del núcleo duro de la historia, el supuesto «cambio de paradigma». Pero, además, la búsqueda de respuestas a esta pregunta llevó en muchos casos a constatar que las nociones y definiciones que se proponían como novedades eran ya ampliamente conocidas y utilizadas por los maestros de Lavoisier. El uso de la balanza contaba con una larga tradición entre farmacéuticos y ensayadores de metales, definiciones de cuerpo simple y compuesto muy similares a la formulada por Lavoisier podían encontrarse en los manuales donde él estudió la química y hasta hubo propuestas de reforma terminológica con cierto alcance en el siglo XVIII. Esta búsqueda del paradigma transmutado llevó también a comprobar la pervivencia de las viejas ideas en los nuevos conceptos. Bastaba con observar la posición de la luz y el calor en la tabla de elementos simples de Lavoisier para darse cuenta del enorme peso que la noción de principio tenía todavía en la nueva química. La revolución se parecía cada vez más a una evolución, más o menos abrupta.

También se desvaneció la idea de una revolución-fundación, cuando una mirada atenta al siglo XVIII devolvió la imagen de una disciplina reconocida social e institucionalmente, con programas de investigación consolidados y con teorías explicativas y métodos y técnicas experimentales que contaban con un amplio consenso y eran reconocidas como rasgos distintivos de la química. Una disciplina, eso sí, de fronteras muy difusas y estructura extremadamente heterogénea.

Los historiadores han hecho hincapié en la importancia de las diferentes «culturas de la química», entendiendo por tal las distintas tradiciones académicas y profesionales en donde la química se cultivó desde mucho antes de la llegada de Lavoisier y en las que se siguió cultivando durante mucho tiempo después. Nos referimos a la filosofía natural, la medicina y la farmacia, la minería y la metalurgia, las artes y manufacturas, la artillería, la incipiente industria química, etcétera. Tradiciones académicas y profesionales en las que la química se cultivó desde intereses muy diferentes; en las que los saberes se transmitieron de una generación a otra siguiendo formas de enseñanza y aprendizaje que iban desde la imitación del gesto en los talleres y laboratorios farmacéuticos hasta la demostración pública de aparatos y fenómenos en anfiteatros y plazas, pasando por la lección o el libro de texto; y en las que, por supuesto, las explicaciones, los instrumentos, los métodos, los espacios y hasta el lenguaje adquirieron formas muy diferentes. Y, tras ellas, comunidades de químicos que compaginaron su reconocimiento como tales y su pertenencia a una o varias de esas tradiciones académicas y profesionales. Comunidades que se organizaron en los ámbitos locales y nacionales y que tejieron también tupidas redes de comunicación internacional, utilizando y transformando medios como la correspondencia y el libro impreso, las memorias académicas y el incipiente periodismo científico o el viaje de estudio, el espionaje industrial y hasta el exilio. La obra de un genio solitario comenzaba a tomar la forma de una empresa colectiva en la que los saberes fueron formulados, sometidos a controversia y consensuados en un complejo proceso de negociación en el que participaron químicos de origen, formación y ocupación muy diferentes.

La riqueza y heterogeneidad de los territorios ocupados por la química obligó también a repensar el significado y las consecuencias que tuvieron en cada uno de ellos los cambios considerados revolucionarios. Buena parte de las aportaciones teóricas y experimentales atribuidas a Lavoisier tuvieron su origen en la química pneumática, un territorio de investigación nuevo y atractivo que se ubicaba en la frontera entre la química y la física experimental. Las preguntas, los métodos de investigación y hasta el instrumental empleado en esta nueva química de los gases diferían considerablemente de los que reconocían como propios la inmensa mayoría de los químicos, ocupados en el análisis vegetal y animal, en la química de las sales o en la metalurgia. En estos grandes campos de la química, las nuevas propuestas teóricas, metodológicas y hasta terminológicas tuvieron una repercusión muy desigual y a menudo escasa, lo que hace que algunos historiadores consideren más adecuado hablar de una revolución *en* la química que de una revolución *de* la química, queriendo subrayar con ello el carácter local y en gran medida periférico del campo de investigación en el que se fraguaron las nuevas ideas.

Historia y memoria

La contundencia de esas y otras muchas conclusiones de la investigación histórica contrasta con la escasa repercusión que han tenido en esa historia fundacional y heroica de la revolución química que ha seguido reproduciéndose sin apenas alteraciones hasta la actualidad. La multiplicidad de actores, factores y contextos que ofrece la rica y compleja historiografía de la revolución química ha hecho difícil articular una narración coherente y rigurosa de este período que sustituya a la obsoleta, sesgada y mitificada, pero extremadamente sencilla, narración tradicional.

Por otra parte, el proceso de conformación y consolidación de los mitos de la revolución química a través conmemoraciones, exposiciones, libros de texto, discursos académicos y obras de divulgación ha hecho que los personajes, experimentos e instrumentos mitificados hayan entrado a formar parte de la identidad y memoria colectiva de la comunidad química internacional. En ellos han acabado por sustentarse algunos de los rasgos que los químicos han reconocido durante más de dos siglos como distintivos de su disciplina.

En ese espacio de desencuentro reside lo que sin duda es una de las mayores contribuciones que la historia de la química puede ofrecer a los químicos y a las sociedades que han hecho de esta ciencia uno de los pilares de su desarrollo material: servir de fermento para una reflexión crítica acerca del origen, características e imagen social de una disciplina mixta como la química, en la que la ciencia, la industria y las aspiraciones humanas se han dado cita desde hace siglos.

PARA SABER MÁS

Lavoisier: Mémoires d'une revolution. Bernadette Bensaude-Vincent. Flammarion; París, 1993.

Historia de la química. William Brock. Alianza Editorial; Madrid, 1998.

Tractat elemental de química. Antoine Laurent Lavoisier. Dirigido por Agustí Nieto Galán. Pòrtic, IEC y Eumo; Barcelona y Vic, 2003.

La revolución química: entre la historia y la memoria. José Ramón Bertomeu Sánchez y Antonio García Belmar. PUV; Valencia, 2006.

Lavoisier. La revolución química. Marco Beretta. TEMAS de *Investigación y Ciencia* n.º 64, 2011.

Panopticon Lavoisier (1999-2009). Colección digital de los manuscritos, publicaciones, instrumentos e iconografía de Lavoisier o en torno a él. Incluye una cronología y una bibliografía: **193.206.220.40/lavoisier**

por Rubén Ezquerra Miguel



Rubén Ezquerra Miguel es paleontólogo investigador del Instituto de Estudios Riojanos y miembro de la Fundación Patrimonio Paleontológico de La Rioja.

El creacionismo deja huella

Los creacionistas «científicos» literalistas reinterpretan datos paleoicnológicos para intentar demostrar sus tesis bíblicas

Desde comienzos del siglo XX, la interpretación literal de la Biblia se halla bien implantada en los medios evangelistas estadounidenses. A partir de finales de los años sesenta, los adeptos a esta doctrina labraron la credibilidad de la misma mediante reinterpretaciones (erróneas) de datos científicos. Su objetivo: fundar un «creacionismo científico». Hoy en día, todas las ciencias que hacen referencia a un origen o evolución de la Tierra (geología), el universo (astronomía y astrofísica) o la vida (biología y paleontología) conocen corrientes creacionistas.

Además de rechazar la teoría de la evolución, los creacionistas «científicos» literalistas defienden dos convicciones con implicaciones paleontológicas: que los dinosaurios fueron contemporáneos de los hombres y que la mayoría de aquellos desaparecieron en el Diluvio universal. Para demostrarlas, acomodan a su favor datos científicos, que quedan así integrados en su doctrina y originan interpretaciones erróneas. Veamos algunos ejemplos.

Para justificar que los humanos fueron coetáneos de los dinosaurios, los creacionistas afirman que unas huellas fósiles de forma estrecha y alargada encontradas al lado de unas huellas de dinosaurio ubicadas en el río Paluxy cerca de Glen Rose, Texas, pertenecen a pies humanos. En realidad, esas icnitas elongadas, bien conocidas entre los paleoicnólogos, corresponden a la impresión del metatarso de los autópodos posteriores de un dinosaurio.

Otro ejemplo atañe a dos conjuntos de icnitas: uno hallado en la localidad riojana de Enciso y otro en Saint George, en el estado de Utah. Según los estudios paleontológicos, estas huellas demuestran que ciertos dinosaurios terópodos no avianos nadaban de forma eficaz. Además, se sabe que los dinosaurios que las imprimieron no fueron contemporáneos, puesto que las primeras pertenecen al Cretácico inferior (hace unos 125 millones de años) y las segundas al Jurásico inferior (hace unos 180 millones de años).

En cambio, los creacionistas Tas Walker y John H. Whitmore han utilizado esas icnitas para respaldar la hipótesis de que los dinosaurios se extinguieron por causa del Diluvio universal. Afirman que si se han encontrado huellas acuáticas de dinosaurio es porque estos intentaron desesperadamente salvarse antes de fenecer ahogados en un escenario catastrófico marcado por condiciones anormales que no serían sino la muestra de la continua subida de las aguas del Diluvio bíblico. Además, dado el excelente estado de conservación de las huellas, suponen que la sedimentación fue muy rápida, lo que sería consistente con la hipótesis del Diluvio. Según los geólogos creacionistas, durante la gran inundación, se produjeron colisiones entre los continentes, lo que propició que ciertas partes quedaran emergidas de forma temporal. De ahí que solo quedaran impresas las huellas de dinosaurios con capacidades natatorias, puesto que ello les habría permitido alcanzar dichas áreas y sobrevivir durante un tiempo.



Aunque ese razonamiento pueda parecer sólido, sus conclusiones son totalmente erróneas, ya que se apoya en la cronología bíblica y el catastrofismo, según el cual las especies no evolucionan pero pueden desaparecer debido a catástrofes naturales tales como el Diluvio. Los icnólogos, en cambio, se fundan en métodos científicos para datar y explicar la formación de ese tipo de huellas.

Ese tipo de reinterpretaciones pseudocientíficas no son más que tentativas de rechazo de la teoría de la evolución formulada por Darwin. Desde el punto de vista científico, la evolución es innegable. No existe, por tanto, debate intelectual posible entre científicos y creacionistas. Pero resulta difícil ignorar a estos últimos, dada la proliferación, sobre todo en EE.UU., de sus institutos de «investigación». Entre ellos destacan la Sociedad de Investigación sobre la Creación (Creation Research Society), el Instituto para la Investigación de la Creación (Institute for Creation Research) y la organización Respuestas en el Génesis (Answers in Genesis), muy activa en Internet. Además, los promotores del «diseño inteligente», un avatar del creacionismo, han conferido a este movimiento una imagen más científica y moderna, mediante la organización de coloquios, la publicación de revistas y el desarrollo de programas de investigación. El creacionismo tiene también su versión islámica, liderada por la Fundación para la Investigación Científica del turco Harun Yahya, autor del *Atlas de la Creación* que en 2007 se envió de forma gratuita al sistema escolar francés y belga.

Ante los movimientos creacionistas, la ciencia debe continuar defendiéndose a través de la divulgación de sus avances y de una enseñanza que promueva los fundamentos del método científico. Sólo la acción conjunta de una legislación que preserve la laicidad y una comunicación plural que permita transmitir libremente el conocimiento humano impelerá nuestra evolución cultural.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares
de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS*
por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

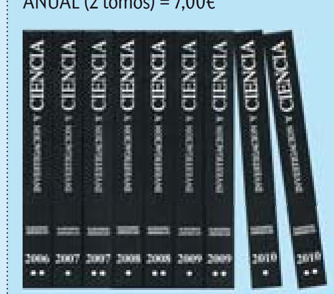
TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos
España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA
España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

NEUROCIENCIA

Consciencia artificial

¿Cómo saber que se ha construido un ordenador con capacidad de sentir y percibir? Haciéndole resolver un sencillo rompecabezas

Christof Koch y Giulio Tononi

Los ordenadores se acercan cada vez más a las conductas humanas inteligentes. Prueba de ello es el ordenador Watson, de IBM, que ha vencido a todos los campeones del concurso de televisión estadounidense *Jeopardy*. No obstante, muchos dudan de que los ordenadores en verdad «vean» una escena repleta de formas y colores a través de sus cámaras, «oigan» una pregunta a través de sus micrófonos o «sientan» (tengan experiencia consciente) como una persona, a pesar de la sobresaliente capacidad de las computadoras para procesar datos a una velocidad sobrehumana.

¿Cómo podríamos saber si una máquina ha adquirido esa cualidad inefable, esto es, el conocimiento consciente? La estrategia que proponemos se basa en la idea de que solo una máquina consciente puede mostrar comprensión subjetiva de si la escena expuesta en una foto ordinaria está «bien» o «mal». Esta facultad de ensamblar un conjunto de datos e integrarlos en una imagen que tenga sentido —por ejemplo, saber que no es razonable que en lo alto de la Torre Eiffel aparezca un elefante equilibrista— define una propiedad esencial de la mente consciente. Pero de momento, ni siquiera una sala repleta de superordenadores puede identificar las cosas razonables o absurdas de una escena.

Conocer los atributos de una máquina consciente nos permitiría no solo entender el funcionamiento de nuestro cerebro, sino también prepararnos para el día, tantas veces contemplado en la literatura de ficción, en que hayamos de convivir con un ser consciente creado por nosotros. De lograrlo, podríamos abordar incluso una de las más profundas cuestiones que han ocupado a los filósofos de todos los tiempos, a saber: ¿qué es la consciencia?

¿PERSONA O GOLEM?

Se ha reflexionado largamente sobre la cuestión de si un simulacro de tipo humano, sea el mítico golem o una máquina instalada en una caja, puede sentir o experimentar cosa alguna. En 1950, Alan Turing, el matemático británico que en la Segunda Guerra Mundial contribuyó a descerrajar el código Enigma de la temida fuerza submarina alemana, publicó un artículo que dio origen a la inteligencia artificial. Turing, en un artículo publicado en la revista *Mind*, proponía reemplazar la vaga pregunta, «¿Pueden pensar las máquinas?», por otra más práctica: «¿Será posible construir una máquina que, al mantener con ella un diálogo a través de un teletipo, resulte indistinguible de una persona?»

En la versión del test de Turing que hoy se aplica, un juez humano interactúa en la pantalla de un ordenador, bien con una persona o bien con un programa informático, en el lenguaje natural que utilizamos para comunicarnos. La conversación entre juez e interlocutor puede tratar de cualquier tema. Si, al cabo de un tiempo razonable, el juez no puede asegurar que su interlocutor no es una persona, se puede afirmar entonces que tal interlocutor es al menos tan inteligente como un humano y ha superado el test de Turing. Con los años se han diseñado programas parlantes que remedan una conversación intranscendente (*chat-*

GEOF KERN

¿Qué error hay en la fotografía? **Para reconocer la incongruencia de esta imagen, una máquina debería ser consciente de numerosos aspectos sobre la realidad (salvo que hubiera sido expresamente programada para analizar esta fotografía).**



Christof Koch es profesor de biología conductista en el Instituto de Tecnología de California e investigador en el Instituto Allen de Ciencias del Cerebro en Seattle.

Giulio Tononi es catedrático de medicina del sueño y profesor de ciencias de la consciencia en la Universidad de Wisconsin-Madison.

EN SÍNTESIS

Las conductas inteligentes de los ordenadores se siguen perfeccionando, pero estas máquinas distan mucho de ser conscientes del mundo que las rodea.

Informáticos y neurobiólogos reflexionan sobre una cuestión afín que entraña aspectos técnicos y metafísicos: ¿Se podrá determinar si una máquina es verdaderamente consciente?

Una prueba sencilla, que se puede realizar en casa con esta revista y unas tijeras, permite determinar definitivamente si existe ya una máquina consciente.

terbot), que alguna vez han engañado a jueces, aunque no durante mucho tiempo.

La consciencia artificial despertó nuestro interés no como informáticos, sino como neurobiólogos que deseaban saber el modo en que el cerebro engendraba la experiencia subjetiva. Mediante resonancia magnética, hemos examinado cerebros de voluntarios sanos y de pacientes con trastornos neurológicos, y hemos registrado sus ondas cerebrales mediante encefalografía. Efectuamos investigaciones similares en cerebros de roedores y de otros animales. Nuestro equipo se centra en los correlatos neuronales de la consciencia: los mecanismos cerebrales mínimos que se necesitan para suscitar una determinada sensación consciente, por ejemplo, la observación de un atardecer espectacular. Pero, hasta hace poco, la disciplina carecía de una teoría general que permitiera valorar, de modo sistemático, si un lesionado cerebral, un feto, un ratón o un artefacto a base de silicio podían experimentar sensaciones conscientes.

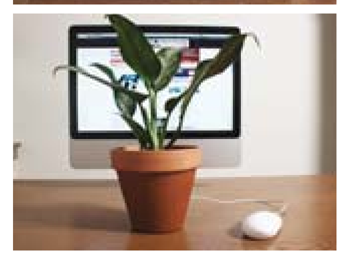
La teoría de la información integrada de la consciencia abre una senda hacia esa meta. Concierne a un factor clave de la consciencia. Muchos intuyen que los estados fenoménicos, subjetivos, que componen la experiencia cotidiana —la forma, sumamente personal, en que cada uno de nosotros percibe un aroma, una escena visual, un pensamiento o un recuerdo— guardan relación con el modo en que el cerebro integra las señales sensoriales con la información de la memoria, con las que construye una imagen coherente del mundo. Ahora bien, ¿cómo concretar esa idea intuitiva?

La teoría de la información integrada aborda esa necesidad y postula dos axiomas. Primero, que la consciencia es muy informativa. Es así porque cada estado consciente, cuando acontece, descarta un inmenso número de otros estados posibles, de los cuales difiere de modo propio y peculiar. Pensemos en los fotogramas de todas las películas que hayamos visto. Cada cuadro, cada toma, constituye un percepto consciente específico: cuando se percibe ese fotograma, el cerebro descarta billones de otras imágenes posibles. Incluso si nos despertamos en una habitación totalmente oscura —la más simple de las experiencias visuales— la percepción de la completa negrura implica que no estamos viendo una sala de estar bien iluminada, la espesura de una jungla o alguna de las incontables escenas que podrían aparecer en nuestra mente.

Segundo, la información consciente se halla integrada. Cuando reconocemos el rostro de una persona, resulta imposible no ver al mismo tiempo que está llorando y lleva gafas. Por mucho que nos esforcemos, no podremos separar la mitad izquierda de nuestro campo de visión de la mitad derecha; ni dejar de ver los colores y percibir solamente figuras en blanco y negro. Toda escena que penetre hasta la consciencia permanece íntegra y completa; no es posible subdividirla en elementos independientes sin relación alguna entre ellos.

La naturaleza unificada de la consciencia emana de una multitud de interacciones entre partes relevantes del cerebro. La desconexión de áreas cerebrales, como en la anestesia o en el sueño profundo, causa la obnubilación de la consciencia y, quizá, su desaparición.





¿Correcto o incorrecto? Para comprobar si una máquina es consciente se le podría preguntar cuál de las dos imágenes es errónea. La tarea haría fracasar a cualquier autómata de hoy.

ERIC WEEKS

Así pues, un ser consciente constituye una entidad individual e integrada provista de un enorme repertorio de estados distinguibles o información. Para medir la capacidad de información integrada y, por tanto de consciencia, de un sistema debemos indagar la cantidad de información que trasciende a las partes que componen el sistema. Esa cantidad, denotada Φ, puede calcularse, en principio, para cualquier sistema, trátese de un cerebro, un robot o un termostato regulable manualmente. Pensemos en Φ como la irreducibilidad de un sistema a una mera colección de partes, medida en bits. Para que un sistema posea un alto grado de Φ y de consciencia, ha de estar compuesto por partes especializadas y bien integradas, esto es, componentes que funcionen mejor juntos que separados.

Un sistema con elementos muy independientes, como los sensores de una cámara fotográfica o los bits de memoria de un ordenador, presentará un valor reducido de Φ. El valor también será pequeño si todos los elementos hacen lo mismo, pues eso entraña que no están especializados y, por tanto, son redundantes. Y también se mantendrá bajo cuando los elementos del sistema se hallen interconectados al azar. En cambio, en ciertas regiones del cerebro, como la corteza, donde las neuronas están dotadas de conexiones específicas, Φ alcanzará un valor elevado. Esta medida del grado de integración de un sistema es aplicable, asimismo, a circuitos electrónicos alojados en cajas metálicas. Los ordenadores alcanzarían un alto grado de información integrada, igual que el cerebro, si las conexiones entre sus transistores y sus elementos de memoria fuesen lo bastante complejas.

Pero además de la difícil tarea de medir Φ, ¿cómo podríamos saber si una máquina es consciente?; ¿qué clase de ensayo resultaría factible? Una forma de sondear la integración de su información consistiría en preguntarle algo que un niño de seis años respondería sin dificultad: «¿Qué error hay en la figura?». La solución de este sencillo problema exige disponer de una enorme cantidad de información contextual, muchísima más de la que proporcionan los algoritmos en que se basan los ordenadores más avanzados para identificar un rostro o detectar tarjetas de crédito fraudulentas.

Las imágenes de objetos o de escenas naturales contienen relaciones muy intrincadas entre píxeles y objetos; de ahí el aforismo «una imagen vale más que mil palabras». La evolución de nuestro sistema visual, de nuestro desarrollo neurológico en la infancia, más toda la experiencia adquirida durante la vida, nos capacitan para reconocer al instante si todos los componentes de la imagen concuerdan debidamente: ¿tienen sentido las texturas, las profundidades, los colores, las relaciones espaciales entre las partes?

Un ordenador que analizase una imagen para buscar en ella información incoherente requeriría mucho más procesamiento que para efectuar búsquedas lingüísticas en una base de datos informática. Los ordenadores habrán vencido a los humanos en juegos complejos, pero siguen sin saber responder a preguntas arbitrarias sobre lo que se ve en una fotografía. La explicación de esa diferencia reside en el grado de integración de la información. Aunque el disco duro de un ordenador tenga capacidad para almacenar todos los recuerdos de una vida, esa infor-

mación no se halla integrada: existe una desconexión casi total entre los distintos elementos del sistema.

VACAS TRANSPARENTES

Baste un ejemplo: una foto de su escritorio. Su ordenador ignora si, en el habitual batiburrillo de la mesa, es razonable que el ratón se sitúe a la derecha y la pantalla a la izquierda. Tampoco sabe que, además, es absurdo que el lugar del teclado, frente a la pantalla, lo ocupe una maceta; o que es imposible que el ratón se cierna en el aire sobre la mesa; ni puede saber que aunque el lado derecho de la foto casa con el izquierdo, la mitad derecha de otras fotos no se ajustaría a este. Para el ordenador, todos los píxeles forman un tapiz vasto e inconexo de ternas de números (correspondientes a tres colores), sin un significado concreto. Para una persona, una imagen cobra sentido porque presenta vínculos entre sus partes a distintos niveles: píxeles, objetos y escenas. Y esas relaciones no solo especifican la coherencia entre los elementos de la imagen, sino también su discrepancia. De acuerdo con nuestra teoría, esa red integrada de información compleja confiere a cada imagen una identidad y la distingue de un sinfín de otras, y nos permite ser conscientes del mundo que nos rodea.

Esa integración informa incluso a un niño de seis años sobre lo absurdo de numerosas imágenes; por ejemplo, un patinador sobre hielo en la alfombra del cuarto de estar, una vaca transparente o un ratón persiguiendo a un gato. Y ahí reside la clave para determinar si un ordenador posee consciencia. La percepción de esas incongruencias da cuenta del notable conocimiento que tenemos acerca de la aparición conjunta de ciertas situaciones y objetos, así como de la imposibilidad de otras numerosas combinaciones.

Para verificar en qué medida un ordenador entiende una imagen, no es necesario recurrir al protocolo de Turing. Basta con bajar de la Red algunas imágenes tomadas al azar. Se sustituye el tercio central de cada una de ellas por una franja negra vertical, y se barajan después los lados derecho e izquierdo de las figuras resultantes. Las partes derecha e izquierda de las nuevas composiciones no van a casar, excepto tal vez en alguna ocasión, cuando el tercio izquierdo proceda de la misma imagen que el derecho. Ahora se le pide al ordenador que seleccione la única imagen, si la hay, que sea correcta. La franja central negra sirve para evitar que se apliquen las estrategias simples de análisis gráfico utilizadas en informática, a saber, la concordancia de líneas de textura o de color de las imágenes parciales separadas. El test de la escisión de la imagen exige un alto grado de comprensión visual y capacidad deductiva para prever cómo han de encajar las partes de la imagen.

Otro test consiste en insertar objetos en diversas imágenes, de modo que dichos objetos tengan sentido en cada una de ellas, excepto en una, que el ordenador ha de discriminar. Es razonable que un martillo descanse sobre un banco de taller, pero una herramienta difícilmente permanecerá suspendida en el aire. Y un teclado, y no una planta en una maceta, debe ocupar el lugar frente a la pantalla de un ordenador.

Existen varias estrategias informáticas, basadas en tratamientos estadísticos de las características básicas de la imagen, como sus colores, bordes o texturas, con las que se podría superar alguna de las pruebas mencionadas; pero el ordenador no podría hacer frente a las distintas pruebas gráficas. Un test realmente eficaz exigiría una mayor elaboración. No obstante, el ejercicio expuesto pone de relieve la gran cantidad de datos integrados que percibimos de forma consciente y resalta con nitidez el conocimiento restringido y especializado que poseen los actuales sistemas de visión por ordenador. Cierto es que las máquinas actuales pueden identificar el rostro de un posible terrorista a partir de una base de datos que contiene un millón de caras. Pero no reconocerán su edad, sexo o etnicidad, si se halla mirando directamente al observador o no, ni si el individuo está ceñudo o sonriente. Y no deducen que, si aparece estrechándole la mano a George Washington, lo más probable es que la foto haya sido trucada por medios digitales. Cualquier persona consciente percibe esa información y otras con una simple ojeada.

¿Qué cabe esperar en un futuro cercano? Las tareas concretas, en la medida en que puedan ser individualizadas, caracterizadas y diferenciadas de las demás, pueden ser realizadas por máquinas. Provistas de algoritmos rápidos, exploran enormes bases de datos y vencen a los humanos en el ajedrez o un concurso de televisión. Es posible diseñar refinados algoritmos de aprendizaje para que las máquinas identifiquen rostros o detecten la presencia de peatones, y lo hagan mejor y más rápidamente que nosotros. Podemos imaginar sin dificultad una situación en que las tareas especializadas se releguen a máquinas. Los sistemas más punteros de visión por ordenador están alcanzando la mayoría de edad, y en menos de un decenio los vehículos dispondrán de robustos sistemas de conducción con un alto grado de automatismo.

Aun así, pronosticamos que tales sistemas no podrán responder a preguntas sencillas sobre la escena que veamos desde el automóvil. Al acercarnos por la autopista a una gran ciudad, ¿no nos recuerda su silueta a los restos chamuscados de un bosquecillo, vistos a través de la bruma?; ¿se dará cuenta el ordenador de que la banana gigantesca que decora el acceso a una estación de servicios es absurda? Para responder a preguntas así —y a millones de otras— o para detectar el sinsentido del plátano en la gasolinera, haría falta un sinfín de módulos de programas informáticos especializados, imposibles de preparar por anticipado en previsión de preguntas concretas como esas. Si nos hallamos en lo cierto, aunque los sistemas avanzados de visión por ordenador consigan una conducción automática perfeccionada —y simplifiquen también otras tareas diarias— esos sistemas no verán conscientemente una escena que se produzca ante sí.

Pero también cabría imaginarse un tipo de máquina diferente, en la que un sistema único e integrado incluyera el conocimiento de las innumerables relaciones existentes entre las cosas. En tal máquina, la respuesta a la pregunta: «¿Qué errores contiene esta imagen?» sería instantánea, porque las anomalías no concordarían con las restricciones intrínsecas impuestas por el modo en que la información se halla integrada en el sistema.

Una máquina así resultaría eficaz en las labores no fácilmente separables en tareas independientes. Por su capacidad de integrar información, percibiría las escenas de forma consciente. Y sospechamos que para alcanzar altos grados de integración, esa máquina deberá basarse en los principios estructurales del cerebro de los mamíferos. Dichas máquinas superarían las pruebas que hemos descrito y, tras lograrlo, compartirían con nosotros el don de la consciencia, una de las capacidades más enigmáticas del universo.

PARA SABER MÁS

Can machines be conscious? Christof Koch y Giulio Tononi en *IEEE Spectrum*, vol. 45, n.º 6, págs. 54-59, junio de 2008.
Consciousness as integrated information: A provisional manifesto. Giulio Tononi en *Biological Bulletin*, vol. 215, n.º 3, págs. 216-242, diciembre de 2008.



TECNOLOGÍA

CARNE DE LABORATORIO

A partir de una placa de Petri, varios científicos se proponen satisfacer el creciente consumo de carne sin agotar el planeta

Jeffrey Bartholet

EN SÍNTESIS

El cultivo de carne en el laboratorio podría contribuir al suministro de alimentos proteicos sin los problemas éticos y ambientales que conllevan las grandes explotaciones ganaderas.

La técnica ha avanzado poco debido, en buena parte, a las dificultades de financiación de las investigaciones.

Una estrategia prometedora consiste en cultivar células pluripotentes embrionarias que más tarde se convierten en células musculares.

Aunque las investigaciones tuvieran éxito, hay quienes dudan de que la población llegue a encontrar apetecible la carne producida en el laboratorio.

KEVIN VAN AELST

Jeffrey Bartholet cuenta con una amplia experiencia como corresponsal estadounidense en el extranjero. Ha sido jefe de la oficina de *Newsweek* en Washington.



La vehemencia en el debate y la exaltación de las ideas resulta común entre visionarios. Willem van Eelen no es una excepción. A sus 87 años puede evocar una vida extraordinaria. Nació en Indonesia cuando ese país se hallaba todavía bajo control holandés. Su padre, médico, dirigía una leprosería. Con menos de 20 años luchó contra los japoneses en la Segunda Guerra Mundial y estuvo varios años cautivo en campos de prisioneros. Los japoneses los utilizaban como esclavos y los mataban de hambre. «Si algún perro perdido cometía la imprudencia de colarse por la alambrada, los prisioneros se le echaban encima, lo despedazaban y se lo comían crudo», recuerda. «En aquellos tiempos, quien mirara mi estómago podía ver el espinazo. Ya estaba muerto.» La experiencia sufrida desencadenó en él una obsesión de por vida hacia la comida, la nutrición y la ciencia de la supervivencia.

De una obsesión a otra. Liberado por los Aliados, van Eelen estudió medicina en la Universidad de Ámsterdam. Un profesor enseñó a los alumnos una muestra de tejido muscular que había hecho crecer en el laboratorio. Esa demostración le inspiró la idea de «cultivar» carne comestible sin necesidad de criar ni sacrificar animales. Se imaginó un alimento rico en proteínas que se obtuviera sin depender del clima o de otras circunstancias ambientales.

Esa idea tiene hoy más vigor que nunca. En 1940, la población apenas superaba los 2000 millones de individuos y el calentamiento global no constituía por entonces un motivo de preocupación. En nuestros días, el planeta soporta una población humana tres veces mayor. Según un informe de la FAO de 2006, la ganadería supone casi el 18 por ciento de todas las emisiones de gases de efecto invernadero, un porcentaje superior al atribuido al sector del transporte. La misma organización estima que el consumo mundial de carne entre 2002 y 2050 casi se duplicará.

Los productos cárnicos preparados en biorreactores, en lugar de granjas, podrían aliviar la presión que ejercemos sobre nuestro planeta. Hanna Tuomisto, doctoranda de la Universidad de Oxford, es coautora de un estudio realizado en 2010 sobre las posibles consecuencias ambientales de los cultivos cárnicos. Según la investigación, ese tipo de producción, basada en el cultivo de células musculares en un hidrolizado de cianobacterias (un tipo de bacterias que proliferan en charcas), reduciría entre un 35 y un 60 por ciento el consumo de energía, entre un 80 y un 95 por ciento las emisiones de gases de efecto invernadero, y emplearía un 98 por ciento menos de suelo que los métodos convencionales europeos de producción cárnica.

De hecho, un 30 por ciento de la superficie terrestre no ocupada por hielo se dedica en la actualidad a pastos o al cultivo de forraje. Si los cultivos cárnicos fuesen técnicamente viables y su consumo se generalizara, gran parte de esas tierras podrían destinarse a otros fines, entre ellos, a bosques, que retirarían dióxido de carbono del aire. Al hallarse los centros de producción cerca de los consumidores, se haría innecesario el transporte de carne entre puntos distantes. Algunos proponentes conciben incluso pequeños laboratorios cárnicos urbanos, que surtirían con sus productos a los *locávoros*.

No hay otra opción

Incluso Winston Churchill pensó en la idea de producir carne in vitro. En su libro *Thoughts and adventures* («Pensamientos y aventuras»), publicado en 1932, el político pronosticaba que «dentro de cincuenta años habremos abandonado el sinsentido de criar un pollo para comernos su pechuga o sus alas, y haremos crecer por separado estas partes en un medio idóneo». Muy pocos, en el siglo xx, parecieron tomar en serio esa idea. Van Eelen no la dejó en el olvido.

Trabajó en toda suerte de empleos: vendió periódicos, condujo taxis y construyó casas de muñecas. Creó una organización de ayuda a niños desvalidos; fue propietario de galerías de arte y de cafés. Escribió propuestas para la producción de carne in vitro y acabó enterrando gran parte de sus ganancias en peticiones de patentes. Junto con otros dos socios obtuvo en 1999 una patente holandesa y otras europeas, y al cabo, también dos patentes estadounidenses. Por fin, en 2005, van Eelen y otros convencieron al Ministerio Holandés de Asuntos Económicos para que destinara dos millones de euros a la investigación de la producción de cárnicos in vitro, la máxima aportación gubernamental que ha sido asignada hasta la fecha para ese fin.

Por aquel entonces, un científico estadounidense, Morris Benjaminson, había logrado obtener un filete de pescado en su laboratorio. La NASA, interesada en el desarrollo de alimentos para viajes espaciales, concedió a Benjaminson una modesta beca de investigación. Este extrajo una muestra de músculo esquelético de una carpa de pecera y la cultivó. Por último, uno de sus asociados marinó brevemente los explantes con aceite de oliva, ajo picado, limón y pimienta, los rebozó con pan rallado y los frió. «Una comisión formada por alguna de nuestras compañeras sometió el producto a inspección visual y olfativa», explica Benjaminson, que en la actualidad es profesor emérito en el Colegio Touro, en el estado de Nueva York. «Su aspecto y aroma se asemejaban a los de cualquier filete de pescado de supermercado.» Pero la NASA, convencida de que habría procedimientos más sencillos de suministrar proteínas a los astronautas, no siguió financiando el proyecto de Benjaminson.

Los fondos holandeses fueron utilizados por van Eelen y H. P. Haagsman, de la Universidad de Utrecht, para fundar un consorcio que demostraría la viabilidad de extraer células pluripotentes de animales de granja, cultivarlas e inducirlas a convertirse en músculo esquelético. En el equipo figuraban un representante de Meester Stegeman BV, compañía de cárnicos

integrada en Sara Corporation Europa, y científicos de renombre de tres universidades holandesas. Cada universidad estudió aspectos diferentes de la producción de carne in vitro. El equipo de Ámsterdam se centró en la obtención de un medio de cultivo eficiente; el grupo de Utrecht pretendía aislar células madre, hacerlas proliferar e inducirlas a convertirse en miocitos (células musculares), mientras que en la Universidad Tecnológica de Eindhoven se propusieron «entrenar» a las células musculares para que aumentasen de tamaño.

Hubo ciertos progresos. Se hicieron crecer en el laboratorio delgadas tiras de tejido muscular que presentaban el aspecto de la carne de vieira y, en la masticación, la textura de los calamares. Pero la producción a escala comercial ofrecía un sinfín de obstáculos. «Hemos adquirido numerosos conocimientos, pero aún no hemos obtenido nada que sepa como una chuleta», explica Peter Verstrate, que representaba a Meester Stegeman en el consorcio y en la actualidad trabaja de asesor. Con el tiempo, los fondos holandeses se agotaron.

Van Eelen echa humo. Según él, uno de los investigadores era «estúpido», y los demás se aprovecharon de él y del Gobierno holandés para sacarles dinero. Los científicos, por su parte, dicen que van Eelen nunca comprendió las dificultades de la empresa. «Van Eelen tenía la ingenua idea de que bastaba sembrar células pluripotentes en una placa de Petri para que crecieran buenamente, y que bastaría invertir dinero en un proyecto para obtener carne en un par de años», asegura Bernard Roelen, citobiólogo de la Universidad de Utrecht que participó en el proyecto.

No ha sido van Eelen el único en imaginar una revolución. Un artículo publicado en 2005 en la revista *Tissue Engineering* describía las perspectivas de la producción industrial de cultivos cárnicos. Entre los autores se contaba Jason G. Matheny, cofundador del grupo New Harvest, que aboga por la producción artificial de carne. Matheny conoce en profundidad las dificultades que ello entraña. «En nuestros días, la ingeniería tisular es realmente difícil y sumamente onerosa», explica. Según él, para que llegue al mercado resulta fundamental resolver los problemas técnicos que disparan su coste. Hará falta dinero, y muy pocos gobiernos u organizaciones se han mostrado dispuestos a conceder la financiación necesaria.

Los científicos implicados lamentan la ausencia de visión de futuro. «La producción de carne in vitro será la única opción que va a quedarnos», opina Mark J. Post, director del departamento de fisiología de la Universidad de Maastricht. «No veo el modo en que podamos seguir dependiendo de la ganadería tradicional en los decenios venideros.»

FASES DE LA TÉCNICA

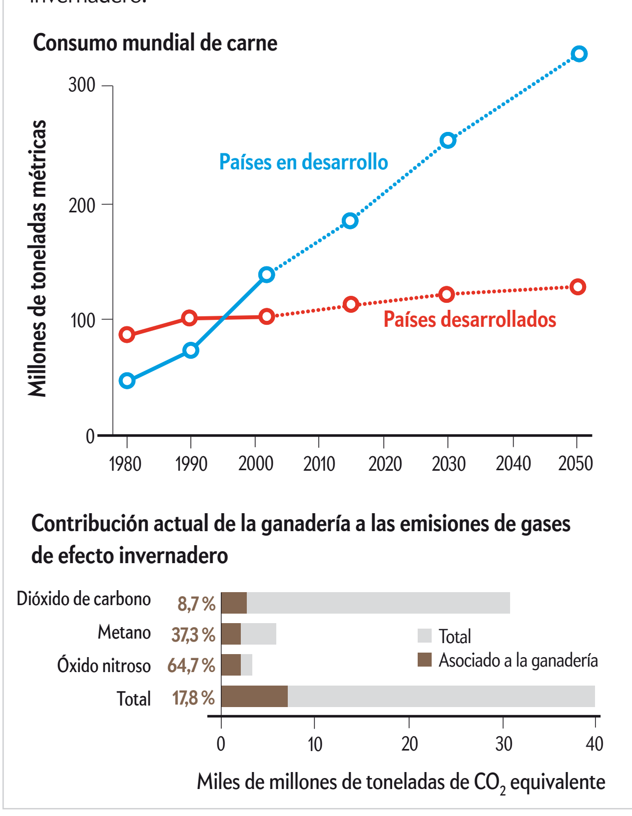
En teoría, una fábrica de carne artificial funcionaría del siguiente modo: primero, los técnicos habrían de aislar células pluripotentes, embrionarias o adultas, de cerdos, vacas, gallinas u otros animales de granja. A continuación, esas células se cultivarían en un biorreactor, con el empleo de un medio de cultivo vegetal. Las células pluripotentes se multiplicarían a lo largo de meses. En el momento oportuno, se las instruiría para que se convirtieran en miocitos (y no en neuronas u osteocitos). Por último, los miocitos deberían formar una masa compacta, de modo semejante a como lo hacen los animales cuando desarrollan la musculatura mediante ejercicio físico.

Las distintas etapas del proceso plantean importantes dificultades. Una de ellas, el desarrollo de linajes celulares pluripotentes que proliferen durante largo tiempo, sin que sus individuos decidan inoportunamente diferenciarse por sí mismos. Otro reto consiste en obtener un gran número de células musculares a partir de las células pluripotentes. «Necesitamos que de cada diez células, al menos siete u ocho se transformen en miocitos, y no solo tres o cuatro», explica Roelen. «En la actualidad logramos que lo hagan en torno al 50 por ciento.»

TENDENCIA MUNDIAL

Problemas con la carne

El primer mundo engulle mucha carne y el mundo en desarrollo se está poniendo a la par. Una de las causas está relacionada con la migración de la población hacia las ciudades, donde las infraestructuras permiten conservar mejor la carne desde el matadero hasta las cocinas. Pero al aumentar la demanda se agravan los daños ambientales. La ganadería supone ya el 17,8 por ciento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero.



FUENTES: «LIVESTOCK PRODUCTION: RECENT TRENDS, FUTURE PROSPECTS», POR PHILIP K. THORNTON, EN *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 365; 2010 (*gráfica de consumo*); «LIVESTOCK'S LONG SHADOW», REPORT OF THE FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2006 (*gráfica de emisiones*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

Los científicos de Utrecht se propusieron extraer y desarrollar linajes de células pluripotentes de cerdos. En condiciones normales, tales células se multiplicarían a diario durante largo tiempo, lo que supondría que con solo diez células se podría generar una pasmosa cantidad de carne en unos dos meses; tal vez, más de 50.000 toneladas. Según una publicación de 2009 del equipo de Utrecht, el cultivo de células embrionarias resultaría ideal para este propósito, dado que esas células poseen una capacidad casi ilimitada de autorrenovación. En teoría, bastaría un solo linaje celular para alimentar al mundo.

Pero hasta ahora, tales linajes solo se han desarrollado a partir de ratas, ratones, monos rhesus y humanos. Las células pluripotentes embrionarias de animales de granja tienden a diferenciarse pronto en células especializadas. Las de cerdo producen con preferencia linajes neuronales, en lugar de musculares.

LA TÉCNICA



El grupo de Utrecht ha trabajado también con células madre adultas, que presentan la ventaja de hallarse programadas de antemano. Esas células forman parte de la musculatura esquelética (así como de otras partes del cuerpo) y tienen una misión concreta: reparar los tejidos que sufren daños o mueren. Así pues, si en la fabricación de carne se desea que la mayoría de las células pluripotentes se conviertan en miocitos, debería partirse de células madre adultas procedentes de músculo esquelético. Pero en los experimentos no se ha conseguido que estas células proliferen tan fácilmente como las embrionarias.

Otro inconveniente que presenta la técnica es su elevado coste. Los medios de cultivo para el desarrollo de células pluripotentes resultan muy costosos. Con los medios actuales, la producción in vitro de un kilo de carne ascendería a 70.000 euros, según Roelen; el medio más eficaz se obtiene a partir de suero fetal de ternera o potro, extraído de animales sacrificados. En los últimos años, varios científicos han creado «medios químicamente definidos», sin productos de origen animal. Valiéndose de técnicas basadas en ADN recombinante, han logrado también que células vegetales produzcan proteínas animales, utilizables a su vez para la fabricación de carne. Pero también esos nuevos medios resultan prohibitivamente onerosos. Un caldo de cultivo basado en extractos de algas presentaría la máxima eficacia, porque las algas sintetizan las proteínas y aminoácidos necesarios para el sostén de la vida celular; pero incluso esta solución resulta costosa, al menos por ahora.

Una vez se haya logrado una provisión suficiente de miocitos, será necesario mantenerlos vivos y forzarlos a que se agrupen en estructuras compactas. En la actualidad es posible producir una tira fina de tejido, pero en cuanto su espesor excede unas cuantas capas celulares, algunas partes empiezan a morir. Las células necesitan una aportación continua de nutrientes para mantenerse vivas. En nuestro organismo, por ejemplo, los nutrientes se suministran a través del torrente circulatorio, que se encarga también de eliminar los desechos. Post está trabajando en el desarrollo de un sistema tridimensional que distribuya los nutrientes.

También está explorando una estrategia para que los miocitos se agrupen y compacten. «Cuando nos retiran la escayola, después de una fractura ósea, nos llevamos un susto. Los músculos se han atrofiado. Pero al cabo de unas semanas vuelven a estar en forma. Hemos de reproducir en el laboratorio ese proceso.» El cuerpo lo consigue de diversas formas, una de ellas, mediante el ejercicio físico. En el laboratorio se puede estimular la formación de tejido mediante impulsos eléctricos, pero la técnica, además de costosa, resulta ineficiente y solo consigue agrupar un diez por ciento de las células. Otro método consiste, sencillamente, en proporcionar a los miocitos puntos de anclaje, pues una vez las células logran asirse a diferentes puntos, adquieren tensión por sí mismas. Post ha puesto anclajes a disposición de los miocitos mediante la creación de un andamiaje tridimensional de glucopolímeros, que se degrada con el tiempo.

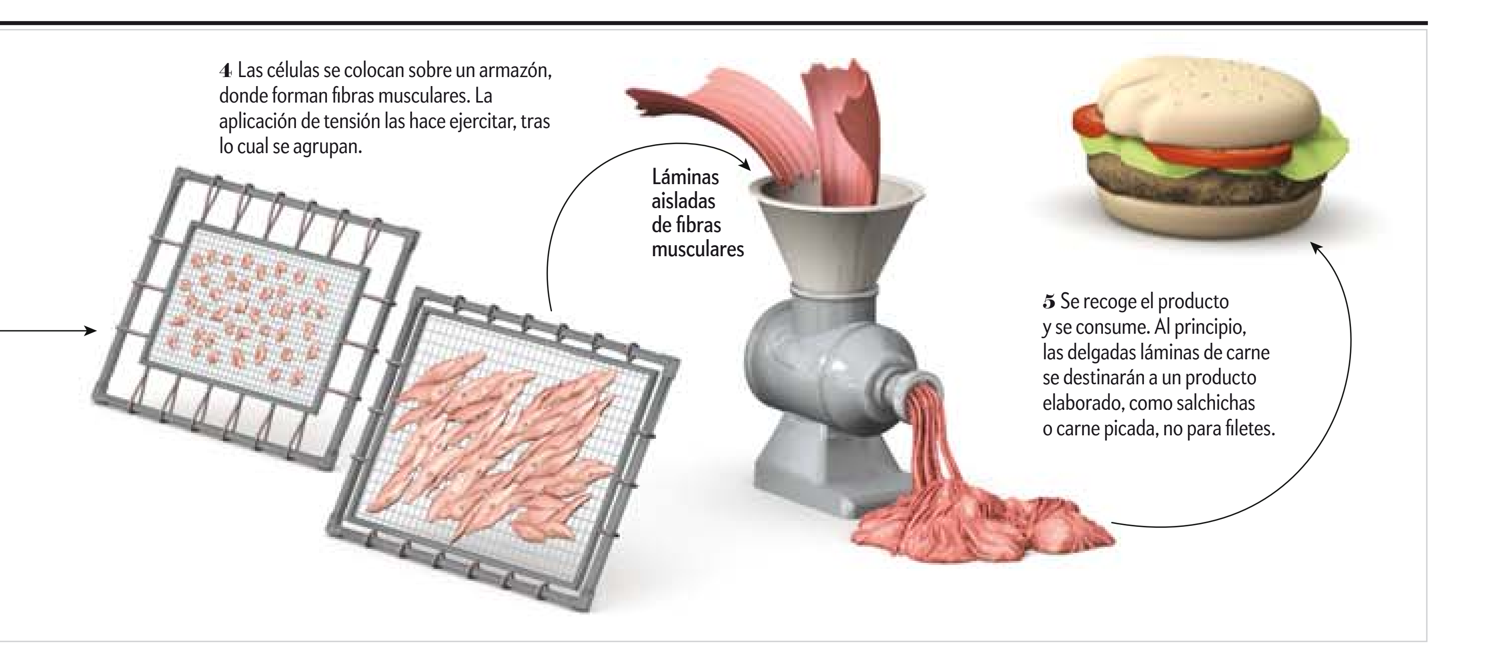
Está considerando otro método; tal vez el más eficaz, pero también más complejo. El organismo estimula de forma natural el crecimiento muscular mediante microimpulsos de neurotransmisores como la acetilcolina. Estos compuestos son económicos, lo que hace interesante el método. «Lo esencial es aplicar impulsos muy, muy cortos», explica. Las dificultades, en este caso, son técnicas, no científicas.

Sin duda hará falta dinero para avanzar en los distintos campos. En 2008, una organización para el tratamiento ético de los animales (PETA) ofreció un millón de dólares a quien, en 2012, obtuviera carne de gallina in vitro comercialmente viable. Pero tal oferta constituía sobre todo una astucia publicitaria, no una ayuda a las investigaciones actuales. Más serio es el compromiso del Gobierno holandés, que ha presupuestado otros 800.000 euros para un nuevo proyecto cuatrienal que permitirá proseguir en Utrecht las investigaciones con células pluripotentes, así como iniciar un estudio sobre las cuestiones sociales y éticas que entraña la carne artificial.

AVERSIÓN HACIA EL PRODUCTO

Muchos consideran que el más importante de todos los obstáculos que deberá superar la producción cárnica in vitro a escala comercial va a ser la aceptación social. «He comentado con científicos la posibilidad de cultivar carne y a todos les parece una idea excelente», dice Tuomisto. «Pero las personas corrientes se muestran mucho más reacias. Les parece algo espeluznante.

EMILY COOPER



A pesar de que, en esencia, se trata de lo mismo: células musculares, solo que producidas de distinta forma.»

Cor van der Weele, de la Universidad Wageningen, se centra en los aspectos filosóficos del nuevo estudio holandés. ¿Supone la carne cultivada un imperativo moral o resulta moralmente repugnante? ¿O bien representa una combinación de ambos aspectos? A van der Weele le interesan las reacciones emocionales, o «respuesta de aversión», que desencadena esa idea en algunas personas.

Pero esa percepción puede cambiar en poco tiempo, señala van der Weele. Y apunta que el cultivo de carne se suele relacionar con otras dos ideas: los alimentos transgénicos —considerados por muchos un peligroso plan de grandes corporaciones para controlar el suministro de alimentos— y la percepción negativa que se tiene de la industria cárnica en general, asociada a grandes explotaciones, patologías y maltrato de animales. Pero cuando las personas saben que la carne cultivada no se ha modificado genéticamente y que podría suponer una alternativa a las granjas industriales, limpia y respetuosa con los animales, el rechazo a menudo desaparece.

Mas tales observaciones son anecdóticas. El estudio se propone evaluar con detalle la respuesta popular a la carne in vitro, incluida la comparación transversal de diferentes regiones y culturas, y determinar formas de atraer el interés de los consumidores. Los proponentes imaginan un día en que los Gobiernos aprueben «impuestos ecológicos» sobre las carnes producidas por ganado vivo; o la fecha en que los consumidores puedan optar por carne in vitro con el marchamo de «carne incruenta».

«Creo que a los consumidores no les gustaría conocer las condiciones higiénicas de la mayoría de los mataderos, ni la eficiencia de la eutanasia», afirma Post. Si se desencadenase un nuevo brote epidémico, como la gripe aviar o el mal de las vacas locas, la carne artificial se volvería más apetecible. «Muy pocas veces pensamos en el origen de lo que comemos», explica Roelen. «Cuando nos zampamos una hamburguesa, casi nadie piensa "Me estoy comiendo una vaca muerta". Ante tal distanciamiento, no resulta difícil imaginar a la gente comiendo carne cultivada.»

Post tiene un osado plan para recabar nueva financiación: se propone crear una salchicha en el laboratorio tan solo para demostrar que ello es factible. Según estima, costará unos 200.000 euros y ocupará durante seis meses a dos doctorandos, que trabajarían con tres incubadoras. «Obtendremos dos o tres biopsias de cerdo, lo que supone unas 10.000 células pluripotentes», prosigue Post. «Cuando esa población se haya duplicado 20 veces, se habrán generado unos 10.000 millones de células.» Los doctorandos utilizarán 3000 placas de Petri para producir numerosos trocitos de tejido muscular porcino, que a continuación se compactarán en un envase, con adición de algunas especias y otros ingredientes no cárnicos para darles sabor y textura. Al final del proceso, los científicos podrán exhibir la salchicha junto al cerdo vivo del cual procede.

«Se trata básicamente de un efecto publicitario para lograr más fondos», afirma Post. «Tratamos de demostrar que es posible elaborar un alimento a partir de un animal vivo». Pero ¿se parecerá el sabor al de una salchicha? «Yo creo que sí», afirma Roelen. «Casi todo el sabor de un bocadito de pollo o de una salchicha se ha conseguido de manera artificial. Se les añade sal y otras cosas para hacerlos apetecibles.»

A van Eelen, que se tiene a sí mismo por «el padrino de la carne in vitro», no le entusiasma la idea de la salchicha. Es un idealista irreductible. Considera que lo importante es lanzar la revolución de la carne artificial con un producto de aspecto, sabor y olor idénticos al procedente de una granja. Puede que van Eelen comprenda que se le agota el tiempo para ver hecho realidad un sueño que ha perseguido durante toda su vida. «Cada vez que hablas con él, te cuenta que ha conocido a algún científico de prestigio que resolverá sus problemas», comenta Roelen. «Entiendo su punto de vista. Pero no puedo cambiar las leyes del universo.»

PARA SABER MÁS

Production of animal proteins by cell systems. H. P. Haagsman, K. J. Hellingwerf y B. A. J. Roelen. Universidad de Utrecht, octubre de 2009.

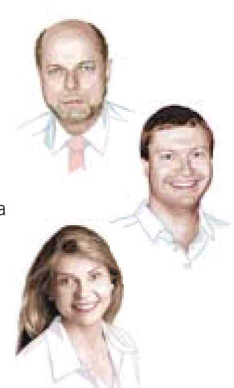
Livestock production: Recent trends, future prospects. Philip K. Thornton en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 365, n.º 1554, págs. 2853-2867, 27 de septiembre de 2010.

Food: A taste of things to come? Nicola Jones en *Nature*, vol. 468, págs. 752-753, 2010.

Animal-free meat biofabrication. B. F. Bhat y Z. Bhat en *American Journal of Food Technology*, vol. 6, n.º 6, págs. 441-459, 2011.



En esta recreación artística de una escena en el puerto de la antigua capital de Dilmún, cuyas ruinas se conocen hoy con el nombre de Calaat al-Bahréin, un escribano realiza un listado de mercancías sobre placas de arcilla.



Randolf Rausch es geólogo y director técnico de un proyecto para el estudio de aguas subterráneas que la Agencia Alemana para la Cooperación Tecnológica lleva a cabo en Arabia Saudí. **Heiko Dirks** es hidrogeólogo y trabaja para Dornier Consulting, también en Arabia Saudí. **Katlen Trautmann** trabaja como periodista especializada en ciencia y economía.

GEOARQUEOLOGÍA

Las aguas artesianas de Dilmún

En la isla de Bahréin brotaba hasta hace poco el agua de unos manantiales que cuatro milenios atrás permitieron el florecimiento de una cultura muy avanzada. Estudios hidrogeológicos descubren los orígenes de esos acuíferos

Randolf Rausch, Heiko Dirks y Katlen Trautmann

Un calor sofocante asfixia la isla de Bahréin. Con sus 50 kilómetros de largo y 20 de ancho, es una de las seis islas de mayor tamaño del golfo pérsico. Mientras toma una taza de té, Said contempla su pequeño terreno, donde se alzan dos palmeras datileras secas. Recuerda la época de su infancia, cuando su familia poseía toda una plantación. Por la zona discurrían las aguas procedentes de un manantial cercano del que hoy, sin embargo, el agua ya no brota. La gente achaca la culpa al petróleo. A Said, por su parte, no parece importarle demasiado. Se alegra de no tener que trabajar más en la plantación. Sus hijos disfrutan de un trabajo bien remunerado en Manama, la capital de la isla, y le facilitan todo lo necesario.

Aunque hoy secos, esos manantiales han supuesto siempre un bien de gran valor para los isleños. Y no solo cuando Said era niño: hace más de 4000 años, ayudaron a sentar las bases de una civilización muy avanzada. Su nombre coincide con el del lugar mitológico de Dilmún, mencionado en los textos cuneiformes sumerios. Aunque a día de hoy aún persisten numerosas incógnitas sobre dicha cultura, los arequólogos la tienen por una de las mayores civilizaciones de navegantes del mundo antiguo.

Su prosperidad se debió a los recursos hídricos y a su situación estratégica. Todos los barcos que navegaban entre Mesopotamia, Arabia (Magan), África e India (Meluhha) hacían escala allí, ya que la isla servía como lugar de abastecimiento de agua potable y como centro de transbordo de mercancías, lo que

MUSEO NACIONAL DE BAHRÉIN

EN SÍNTESIS

Durante la época sumeria se desarrolló en la isla de Bahréin, entonces Dilmún, una cultura muy avanzada. El enclave se menciona en el poema de Gilgamesh como un «lugar paradisíaco».

Su localización estratégica y la existencia de manantiales de agua dulce convirtieron a Dilmún en un lugar de intercambio de mercancías y en un centro de abastecimiento para las rutas marítimas.

Hasta los años setenta se desconocía la procedencia del agua dulce. Investigaciones recientes han demostrado que esta se acumuló durante las glaciaciones en acuíferos bajo la península arábiga.



Un relieve de la ciudad mesopotámica de Uruk muestra a Gilgamesh y al dios sumerio Enki transportando agua a la superficie desde el Apsu, el océano subterráneo de agua dulce.

garantizaba un flujo constante de productos. La verdura y el cereal crecían en torno a un floreciente oasis de palmeras datileras y el mar proporcionaba pesca en abundancia. Los hallazgos arqueológicos documentan la prosperidad de Dilmún, como prueba el hecho de que sus habitantes gozaban en sus hogares de suelos de piedra.

PARAÍSO TERRENAL

La isla se menciona en una de las narraciones más antiguas de la historia: el poema de Gilgamesh. La epopeya habla de un «paraíso terrenal» donde se prometía la vida eterna, si bien las 170.000 tumbas halladas en la isla demuestan que también ocurrían fallecimientos. Dichas tumbas forman el mayor cementerio prehistórico del mundo. A partir de sus dimensiones, se calcula que, durante la época floreciente de la cultura de Dilmún, la isla debió de contar con unos 46.000 habitantes, lo que suponía una gran aglomeración para la época.

Una densidad de población tan elevada se explica por la abundancia de agua dulce. Ello posibilitó el desarrollo de una agricultura intensiva en una región por lo demás desértica, con un índice de precipitaciones anuales de apenas cien milímetros, una tasa de evaporación muy alta y una temperatura media anual de 26 grados centígrados. Además, los manantiales de Dilmún constituían el emplazamiento más seguro, estratégico y accesible para que los barcos del golfo pérsico se abasteciesen de agua dulce.

El origen de los manantiales ha sido objeto de especulación desde los primeros tiempos. Según la mitología sumerio-babilónica, la tierra y el mar flotaban sobre un océano de agua dulce, el Apsu, del que se alimentaban todos los manantiales y ríos de la superficie. Dicho océano era custodiado por Enki, el dios sumerio de «la sabiduría y el océano de agua dulce bajo la tierra». Según el poema de Gilgamesh, dicha divinidad creó los manantiales de Dilmún. Todavía hoy se mantiene viva la imagen de los dos océanos solapados en el nombre de Bahréin, cuyo significado en árabe es «dos mares».

En cierto modo, la explicación de los antiguos sumerios no resulta tan equivocada: en efecto, el agua dulce de Dilmún procedía de una reserva subterránea. Es cierto que esta no se extendía por todo el planeta, pero formaba un acuífero de gran extensión bajo la península arábiga, cuya agua, procedente de la última glaciación, manaba en la superficie de Bahréin en forma de manantiales artesianos. Así lo han demostrado los estudios hidrogeológicos realizados por la Agencia Alemana para la Cooperación Tecnológica por encargo del Gobierno saudita, ba-

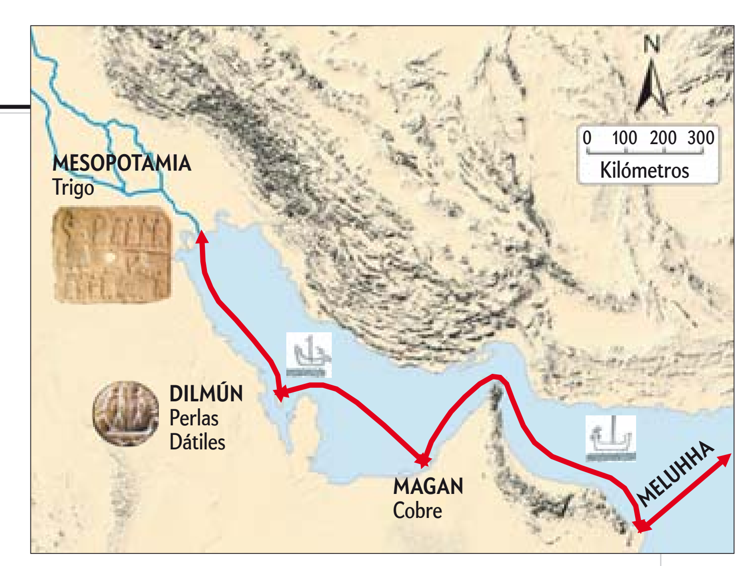
MUSEO NACIONAL DE BAHRÉIN *(relieve)*; RANDOLF RAUSCH Y HEIKO DIRKS *(mapa)*

AGUA POTABLE Y COMERCIO

El origen de una civilización próspera

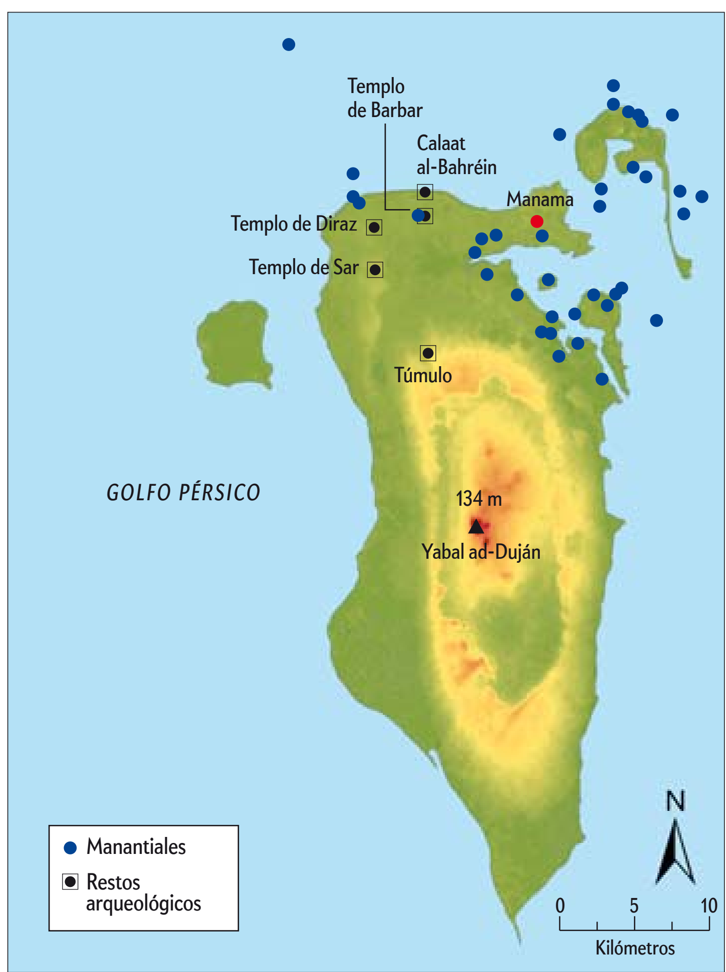
Situada en mitad del golfo pérsico, la isla de Bahréin era en la antigüedad un lugar de atraque estratégico para el el comercio marítimo entre Mesopotamia, África, India (Meluhha) y Arabia (Magan). La isla contaba, además, con otra gran ventaja: sus aguas artesianas constituían la única reserva de agua potable en un área de gran extensión.

La mercancía de mayor importancia en la región era el cobre, el cual viajaba desde Omán hasta Mesopotamia. Bahréin, por su parte, gozaba de fama por la calidad de sus perlas. Los ejemplares más bellos y preciados procedían de las áreas en las que se mezclaban el agua salada y el agua dulce de los manantiales submarinos. Durante sus viajes, de varios meses de duración, los buscadores de perlas utilizaban también los manantiales submarinos para abastecerse de agua potable, que almacenaban en grandes odres de piel de cabra. La isla exportaba además otras mercancías, como dátiles y otros productos agrícolas.



Este mapa muestra las rutas mercantiles marítimas entre las culturas más importantes del golfo pérsico en la época de Dilmún. Existen indicios de que las primeras embarcaciones de la zona se construyeron en caña; a pesar de ello, su capacidad de carga ascendía a unas 20 toneladas. En 1997, el explorador Thor Heyerdahl demostró durante la expedición Tigris la posibilidad de navegar por el golfo pérsico con barcos de tales características.





Bahréin se halla en el golfo pérsico, a escasos kilómetros de la península arábiga. Sus manantiales, hoy ya secos, se concentraban en el norte de la isla. Allí se encuentran los restos arqueológicos más valiosos relativos a la cultura de Dilmún.

sados en las investigaciones que se han venido realizando en el país desde la década de los ochenta.

Junto a nuestros colaboradores, estudiamos más de mil pozos y medimos el nivel freático bajo algunos de ellos. El análisis químico del agua nos permitió conocer su calidad y nivel de salinidad. Mediante ensayos de bombeo, en los que se observaba el descenso del nivel freático al bombear el agua, determinamos los parámetros hidrogeológicos del acuífero, como la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento; a partir de los datos geológicos de las perforaciones dedujimos la estructura y la dimensión de los estratos. Con todos esos datos, desarrollamos un modelo por ordenador que nos ha permitido calcular el nivel freático o la dirección del flujo incluso en áreas donde no se había perforado ningún pozo.

UN CINTURÓN VERDE EN EL DESIERTO

Aún en 1973, Hans Georg Wunderlich, de la Universidad de Stuttgart, fallecido un año después, sospechaba que el agua subterránea de Bahréin provenía del este. El agua procedería de los montes Zagros, en Irán, donde todavía hoy llueve con frecuencia. Wunderlich pensaba que las aguas de lluvia discurrían desde aquella zona, fluían por debajo del golfo pérsico y brotaban en el extremo opuesto al encontrarse con domos de sal rectilíneos o en forma de seta. Los estudios recientes refutan esta hipótesis.

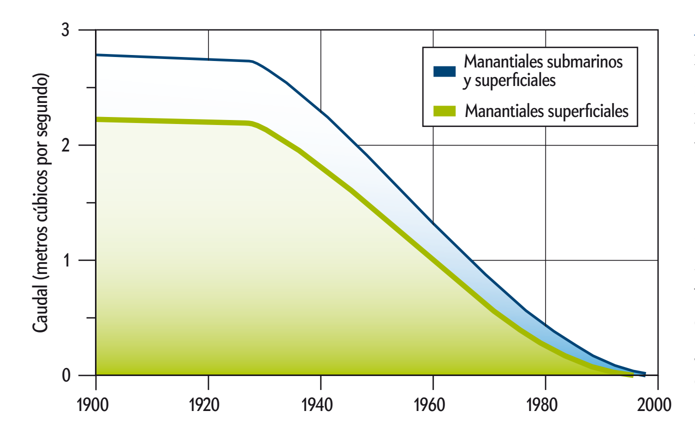
En Bahréin se han documentado por lo menos 36 grandes manantiales desde la mitad del siglo pasado, 15 de ellos en la superficie y 21 en el fondo marino, cerca de la costa. Las aguas han generado un cinturón verde de unos tres kilómetros de ancho al norte de la isla. A lo largo del mismo se encontraban los puertos y las colonias cuyas ruinas todavía pueden admirarse hoy. El caudal de los manantiales superficiales y submarinos asciende a 2,2 y 0,6 metros cúbicos por segundo, respectivamente. En un principio, los manantiales submarinos se hallaban también sobre la superficie, pero quedaron sumergidos tras el ascenso del nivel del mar.

En la península arábiga existen también algunos pozos artesianos; los dos más productivos son los oasis de al-Hasa y al-Catif. Solo el primero produce un caudal de 10 metros cúbicos por segundo, aunque se encuentra a 50 kilómetros en el interior del país y, por lo tanto, muy alejado de las rutas marítimas. El oasis de al-Catif sí se halla junto a la costa; sin embargo, a pesar de arrojar un caudal de unos 2 metros cúbicos por segundo, resultaba de escasa conveniencia para el abastecimiento de los barcos mercantiles, puesto que no existía ningún refugio ante posibles asaltos desde tierra firme. Por otro lado, su agua presentaba una salinización tan elevada que, a pesar de resultar apta para las labores agrícolas, no era potable.

La sola existencia de esos dos grandes oasis en tierra continental pone de manifiesto que el sistema de aguas subterráneas no se circunscribe a la isla de Bahréin. Según los estudios actuales, se extiende por todo el este de la península arábiga e incluye Irak, Kuwait, Arabia Saudí, Bahréin, Catar, los Emiratos Arabes Unidos, Omán y Yemen. Dicho sistema se compone de cuatro acuíferos de gran extensión, situados uno encima del otro y conectados parcialmente entre sí, los cuales abarcan una superficie total de 850.000 kilómetros cuadrados. De hecho, se trata de uno de los mayores sistemas de acuíferos kársticos interconectados del planeta.

Desde el más profundo hasta el más superficial, los acuíferos reciben el nombre de Aruma, Um ar-Raduma, Damam y Neógeno. Todos ellos se encuentran muy karstificados y presentan estructuras típicas, como depresiones y grietas kársticas, dolinas (depresiones en forma de embudo), cavidades y una densa red de fisuras formadas por la disolución del carbonato de calcio. Las cuatro capas estratigráficas se hallan com-

RANDOLF RAUSCH Y HEIKO DIRKS



A la par que el petróleo disparaba un rápido desarrollo económico, el caudal de los manantiales de Bahréin ha disminuido sin cesar desde 1932. Para el abastecimiento de agua se perforaron numerosos pozos; como resultado, los manantiales se encuentran secos desde la década de los noventa.

puestas sobre todo por carbonatos (calcita y, en parte, dolomita), sulfatos (anhidrita y yeso) y, en menor medida, arcillas. Su espesor total oscila entre 800 y 2500 metros, y aumenta en la dirección del golfo pérsico. El conjunto estratificó entre el Cretácico Superior y el Terciario (desde hace 75 millones de años hasta hace 1,8 millones de años) sobre la plataforma arábiga. Durante ese período, la mayor parte de la región se encontraba bajo el mar.

La mayoría del agua subterránea se encuentra en el acuífero de Um ar-Raduma. Sin embargo, sus aguas no brotan en la superficie de Bahréin; los manantiales de la isla se alimentan de las aguas del acuífero de Damam, suprayacente. Entre ambos se encuentra la formación de Rus, compuesta de anhidrita, yeso y, en menor medida, caliza. Cada capa exhibe un comportamiento distinto. Aunque la anhidrita es casi impermeable, los acuíferos no se encuentran aislados unos de otros en todas las zonas. En algunas áreas existen plegamientos (denominados anticlinales) menos gruesos, los cuales se encuentran sometidos a esfuerzos mecánicos procedentes del interior de la Tierra. Ello genera fracturas en la roca por las que el agua subterránea puede infiltrarse en cierta medida.

RÍOS Y MARES EN LA PENÍNSULA ARÁBIGA

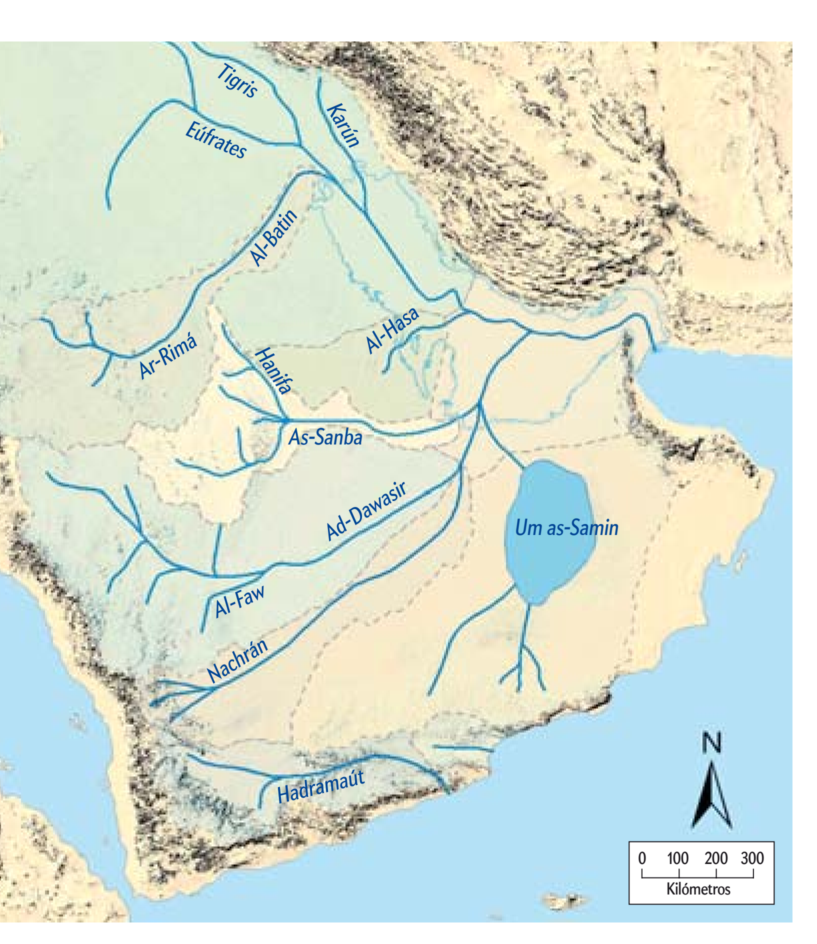
Los acuíferos y su extenso sistema de cavidades y fracturas se originaron en el Plioceno, hace unos 5,3 millones de años. Durante esa época emergió la península arábiga, que quedó convertida en tierra continental. El golfo pérsico, por el contrario, quedó sumergido, por lo que los acuíferos comenzaron a karstificarse en medio de un clima relativamente húmedo. Durante el proceso de karstificación, el carbonato cálcico, poco soluble, se transforma en bicarbonato cálcico, el cual se disuelve con facilidad. Cuanto más dióxido de carbono —y, por tanto, ácido carbónico— contenga el agua, más carbonato cálcico puede descomponerse y disolverse.

Además de una cantidad mínima de precipitaciones, la karstificación suele requerir también una capa de vegetación en la superficie. El agua de infiltración en zonas frondosas contiene mucho más dióxido de carbono que el agua de lluvia, ya que las plantas liberan dióxido de carbono a través de las raíces. Por otro lado, también algunos gases subterráneos, como el dióxido de carbono, el metano o el ácido sulfhídrico, pueden disolver la calcita junto con el agua. Esos gases proceden de las enormes reservas de petróleo que se encuentran bajo los acuíferos al este de la península arábiga. Por otra parte, el yeso que aparece junto con la calcita puede disolverse en agua sin la intervención del dióxido de carbono u otras sustancias. Estos procesos permiten deshacer hasta 2,4 gramos de roca por litro; como resultado, se generan las cavidades típicas de estas formaciones.

El período húmedo finalizó con la llegada de las glaciaciones, hace 1,8 millones de años, durante las cuales se sucedieron fases largas de temperaturas muy frías y épocas cálidas más cortas. En la península arábiga, sin embargo, las diferencias de temperatura fueron menores que en Europa o en Norteamérica; en su lugar, la alternancia tenía lugar entre períodos húmedos y secos. En las fases húmedas se extendía la sabana, mientras que durante las secas se iba estableciendo el desierto.

AGUAS DE ORIGEN GLACIAR

Esas oscilaciones climáticas influyeron también en la karstificación: la intensidad del proceso era menor durante las épocas secas y aumentaba en las fases con mayores precipitaciones. Du-



Durante el Plioceno (desde hace 5,3 hasta hace 1,8 millones de años) y en algunas épocas durante las glaciaciones, el clima fue mucho más húmedo que en la actualidad. En aquel tiempo los ríos discurrían por la península arábiga y existía un extenso lago donde hoy se encuentra la *sabjá* (una cuenca que se cubre de agua de manera esporádica) de Um as-Samin.

RANDOLF RAUSCH Y HEIKO DIRKS



Bajo la meseta de as-Sumán, en Arabia Saudí, se extiende el acuífero de Um ar-Raduma. En esta zona se reconocen elementos típicos de la morfología kárstica, como cuevas y dolinas.

rante las épocas frías, relativamente áridas, el nivel global del mar se encontraba más de cien metros por debajo del actual, ya que una gran cantidad de agua se hallaba retenida en los glaciares. En consecuencia, el golfo pérsico —cuya profundidad no excede los cien metros—, se secó en múltiples ocasiones, en las que los ríos se abrían camino por lo que hoy es el fondo del mar y los estratos más profundos comenzaron a karstificarse. De ese modo se inició la génesis de cavidades y el agua subterránea comenzó a almacenarse.

Dado que desde el final de la última glaciación, hace unos 8000 años, el clima desértico ha dominado en la península arábiga, la recarga del sistema acuífero se limita a las precipitaciones. Dada la escasez de estas, casi toda el agua que contienen los acuíferos es fósil. Así lo demuestran las abundancias de los isótopos estables oxígeno 18 y deuterio, que indican condiciones húmedas durante la época de acumulación del agua subterránea. Las dataciones radiométricas con carbono 14 apuntan a edades de entre 5000 y 25.000 años.

El agua de los manantiales de Bahréin tardó miles de años en hallar su camino hasta la superficie. Pero la diferencia de altura con respecto al interior de la península arábiga, situada a 600 metros sobre el nivel del mar, generó la presión suficiente para que el agua acabase brotando en forma de manantiales artesianos. Bajo la tierra, el agua discurre con gran lentitud hacia el este; una fracción llega hasta el golfo pérsico, mientras que otra brota en forma de oasis o en *sabjat* (lagunas poco profundas) a lo largo de la costa.

El flujo hacia el este del agua subterránea también se pone de manifiesto en la cantidad de minerales disueltos: al oeste, el agua tan solo contiene entre 0,6 y 1 gramos por litro, pero

RELIGIÓN

Manantiales como lugares de culto

En su tiempo, los manantiales de Dilmún se consideraron sagrados y sobre ellos se levantaron templos. En el de Barbar, el hallazgo más espectacular relativo a la civilización de Dilmún, un habitáculo de piedra se alza sobre un manantial.



El templo de Barbar constituye la excavación arqueológica más espectacular de la civilización Dilmún. Aquí se muestran los restos del templo y el manantial sagrado (*derecha*), así como una cabeza de toro trabajada en bronce (*arriba*) hallada en las excavaciones del templo.

Una escalera ceremonial conduce hasta el pozo, desde donde parten canales subterráneos (*canat* o *aflach*) que distribuyen el agua hacia los campos de cultivo.

Se cree que los sacerdotes se ocupaban del reparto del agua. El sistema debía funcionar con gran eficacia, ya que el área se convirtió con rapidez en una región muy poblada durante la época de Dilmún, en el segundo milenio antes de nuestra era. Los campos de cultivo se distribuían alrededor de los manantiales y abarcaban una superficie de entre 50 y 150 kilómetros cuadrados. Tal y como señalan las mediciones geodésicas del antiguo sistema de riego, se hallaban a no más de diez metros sobre el nivel del mar, una altura lo bastante baja como para que el agua de los manantiales la alcanzase con facilidad.

RANDOLF RAUSCH Y HEIKO DIRKS (*arriba*); MUSEO NACIONAL DE BAHRÉIN (*abajo*)

los minerales que disuelve durante el recorrido aumentan su salinidad, que con frecuencia supera los 5 gramos por litro en las zonas costeras. Semejantes concentraciones tornan el agua en no potable e impiden su uso para labores de riego. Sin embargo, el nivel de salinidad varía según las rocas por las que fluye el agua. El agua de los manantiales de Bahréin contenía entre 2,5 y 3,5 gramos de sales disueltas por litro, por lo que sí era potable.

El problema con las aguas de Bahréin residía en su alto contenido en flúor. Su concentración oscilaba entre 0,5 y más de 2,5 miligramos por litro, con considerables variaciones locales. Algunas aguas superaban el límite máximo estipulado hoy por la Organización Mundial de la Salud, que en las regiones cálidas asciende a 1,5 miligramos por litro. Una concentración demasiado alta de flúor conlleva no solo la decoloración de los dientes (fluorosis dental) sino también un crecimiento anómalo de los huesos (fluorosis ósea u osteoclerosis). El hallazgo de un esqueleto correspondiente al inicio de la cultura de Dilmún muestra este hecho de manera drástica: sus vértebras habían crecido parcialmente unidas y se hallaban anquilosadas, lo que apunta a que el individuo padeció una minusvalía grave.

UN RECURSO AGOTADO

El agotamiento de los manantiales de Dilmún no deja de suponer una cierta tragedia para la región. La razón es de sobra conocida: desde los años treinta del siglo pasado, agricultores y empresarios no se han conformado con los manantiales naturales, sino que han excavado otros pozos a fin de bombear más agua. La mayor parte se utilizaba en el campo; el resto se destinaba al abastecimiento de agua potable y a fines industriales. La extracción abusiva ha situado el nivel freático a más de diez metros por debajo de la superficie; además, el agua de mar y la procedente de las profundidades, de salinidad elevada, han empeorado la calidad de las reservas y han acabado por imposibilitar su uso para el cultivo.

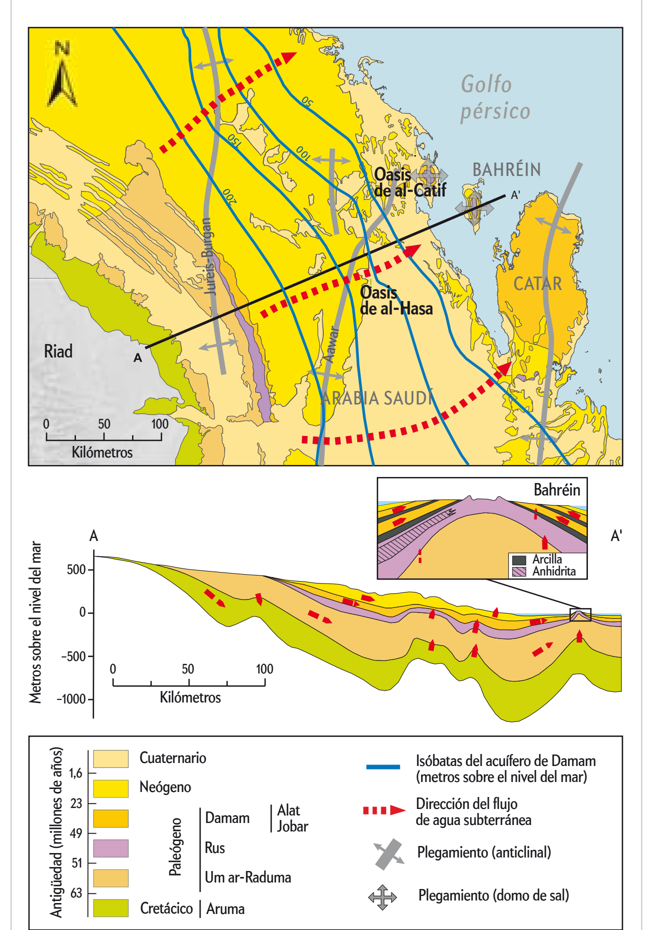
Desde la década de los noventa, los manantiales de Bahréin se encuentran secos y los oasis han vuelto a convertirse en desierto, con lo que se ha echado a perder un abastecimiento de agua potable económico y seguro para la isla. Ahora, Bahréin debe recurrir a la desalinización del agua de mar. El proceso permite obtener unos 3,4 metros cúbicos de agua potable por segundo; un caudal algo superior al de los antiguos manantiales naturales. Por el momento, los costes no suponen ningún problema, ya que se sufragan gracias al petróleo y el gas natural. Pero ¿qué ocurrirá cuando se agoten las reservas de combustibles fósiles? Otro problema reside en la falta de seguridad en el suministro: durante la segunda guerra del Golfo, las plantas desalinizadoras corrieron el riesgo de cerrar a causa del petróleo vertido al mar. La única ventaja del agua marina desalinizada reside en su casi total carencia de flúor.

En Arabia Saudí, donde subyace la mayor parte del sistema de acuíferos, los manantiales de al-Hasa y al-Catif se encuentran también agotados. Cada año se extraen todavía 22.000 millones de metros cúbicos del agua subterránea almacenada en reservas fósiles no renovables. El 92 por ciento se destina a la agricultura, un 6 por ciento se consume como agua potable y un 2 por ciento se dedica a usos industriales. Con todo, los saudíes han decidido aprender de los errores del pasado. El país ha planeado una reducción drástica del consumo para las próximas décadas, una medida que afectará sobre todo al sector agrícola. Un plan de ahorro reciente incluía aminorar poco a poco el cultivo local de cereales, para lo cual programaba una reduc-

ORIGEN GEOLÓGICO

Cómo llegó el agua hasta Dilmún

Los antiguos manantiales de Bahréin pertenecen a un gran sistema de acuíferos (*mapa*) que recorre gran parte de la península arábiga. La roca de la superficie, que cubre los estratos a modo de alfombra, son más recientes cuanto más al este nos encontramos. Las isóbatas (*líneas azules*) indican la profundidad del nivel freático en el acuífero de Damam, del que se alimentan los manantiales de Bahréin. El agua se incorporó al acuífero en el oeste (*corte geológico*) y, a lo largo de un viaje milenario, discurrió hacia el este (*flechas rojas*) siguiendo el buzamiento de los estratos bajo tierra. Estos vuelven a elevarse en la región oriental en forma de plegamientos, uno de los cuales forma la isla de Bahréin (*detalle*). En ella, el acuífero de Damam se subdivide en otros dos: Jobar y Alat. Una capa de arcilla intermedia (*gris oscuro*) forma entre ambos una barrera que apenas permite la infiltración de agua. A su vez, otra capa de arcilla separa ambos acuíferos de la subyacente formación Rus (*lila*). Esta funciona también como capa aislante en aquellas zonas en las que se compone de anhidrita (*zona rayada*), también impermeable. En otras zonas, la formación se halla compuesta de caliza, de forma que el agua confinada en el acuífero de Um ar-Raduma puede manar a la superficie. Sin embargo, dicho acuífero presenta una salinidad más elevada que el de Damam. La extracción abusiva de agua en Bahréin desde mediados del siglo pasado ha favorecido el ascenso de esta agua de alta salinidad.



RANDOLF RAUSCH Y HEIKO DIRKS



Debido a la concentración de fluor del agua subterránea, muchos habitantes de Bahréin padecían fluorosis dental y ósea. Las vértebras de este esqueleto, perteneciente a los primeros tiempos de la civilización de Dilmún, se encuentran parcialmente unidas y anquilosadas, lo que indica que el individuo sufrió una minusvalía grave.

MUSEO NACIONAL DE BAHRÉIN

ción de un 12,5 por ciento anual en la adquisición de trigo producido en el país. En su lugar, se cultivarán plantas mejor adaptadas a los climas áridos. Con el mismo objetivo, se están desarrollando mejores técnicas de riego y otras destinadas a la reutilización de aguas depuradas. Todo ello debería proteger las reservas disponibles y asegurar la disponibilidad de agua potable a largo plazo.

Los más escépticos, no obstante, consideran que las medidas llegan demasiado tarde. Las reservas de gas y petróleo de la península arábiga —y, por ende, los ingresos derivados— durarán entre treinta y cincuenta años. Hasta entonces, la transición hacia un sistema económico independiente de los recursos naturales debería realizarse con éxito para evitar que el país caiga en la pobreza. Como tantas otras veces, la responsabilidad sobre la seguridad futura recae sobre el presente. A Said le resultan indiferentes unas medidas u otras, ya que su vida no se verá afectada. Pero es muy probable que sus hijos y sus nietos sí vean las consecuencias.

PARA SABER MÁS

Life and land use on the Bahrain Islands: The geoarcheology of an ancient society. C. E. Larsen en *Prehistoric Archeology and Ecology Series*. The University of Chicago Press, 1983.

Looking for Dilmun. G. Bibby. Stacey International, 1996.

The desert caves of Saudi Arabia. Stacey International, 2003.

CALENTAMIENTO GLOBAL

«Me atengo a la ciencia»

Entrevista con Richard A. Muller, uno de los fundadores de un nuevo proyecto que pretende zanjar el debate sobre el aumento de las temperaturas durante el último siglo

Entrevista por Michael D. Lemonick

Richard A. Muller nunca se ha sentido cómodo con la ciencia tradicional. En la década de los ochenta, cuando su mentor Luis Álvarez propuso la disparatada idea de que la extinción de los dinosaurios ocurrió debido al impacto de un cometa o un asteroide gigante, el físico de la Universidad de California en Berkeley fue más allá al plantear que el meteorito había sido arrojado por una tenue compañera estelar del Sol, a la que bautizó con el nombre de Némesis. En la década de los noventa, postuló que las glaciaciones se debían al paso de la Tierra por zonas con abundante material interestelar, como consecuencia de variaciones cíclicas en la órbita terrestre.

Hace algo menos, Muller acusó al documental *Una verdad incómoda*, de Al Gore, de ser una pila de medias verdades. Afirmó que las mediciones relativas al calentamiento global se hallaban plagadas de errores de calado e insistió en que muchos de los que advertían sobre el cambio climático habían engañado a la opinión pública. A pesar de hallarse convencido de que el cambio climático es real, potencialmente peligroso y que, al menos en parte, podría estar causado por la acción del hombre, Muller ha criticado a un buen número de climatólogos por haber ignorado las opiniones divergentes, como las del meteorólogo Anthony Watts, autor del blog *Watts Up With That?*, o las del estadístico Steve McIntyre, responsable de *Climate Audit.* Ahora, junto a otros colaboradores, Muller ha iniciado un proyecto cuyo objetivo es obtener un registro fiable de temperaturas de superficie (BEST, por Berkeley Earth Surface Record) a fin de corregir lo que él considera erróneo en la estimación del calentamiento global.

Las ideas de Muller han hecho de él una referencia para los escépticos del cambio climático. Y también para algunos miembros del Partido Republicano estadounidense, quienes lo invi-

EN SÍNTESIS

Richard A. Muller, físico de la Universidad de California en Berkeley, ha criticado muchos de los métodos que se han venido empleando para deducir la existencia de un aumento global de las temperaturas durante el último siglo.

Los estudios realizados hasta la fecha empleaban solo los datos procedentes de una pequeña fracción de las estaciones meteorológicas del planeta. Algunos de los criterios usados para seleccionarlas han levantado polémica.

A fin de zanjar la cuestión, Muller y otros expertos iniciaron en 2010 un proyecto independiente que pretendía hacer uso de todas las mediciones directas de temperatura disponibles y mejorar las estimaciones estadísticas.

En fecha reciente, Muller fue convocado para presentar sus resultados preliminares ante el Congreso estadounidense. El físico sorprendió a muchos al anunciar que, por el momento, sus conclusiones coincidían con las de los estudios precedentes.



TIMOTHY ARCHIBALD

taron a la Cámara de Representantes para que expusiera los resultados preliminares de su proyecto ante el Comité de Ciencia, Espacio y Tecnología el pasado 31 de marzo. Ese día, sin embargo, Muller sorprendió a propios y extraños al declarar que, al menos hasta el momento, los datos de BEST confirmaban el calentamiento del planeta, en sintonía con las proyecciones de los modelos climáticos.

Para algunos escépticos, ese testimonio transformó a Muller de héroe en villano, al tiempo que hizo las delicias de los ecologistas. Se espera que los resultados definitivos de su proyecto estén listos en breve. Si confirman los resultados preliminares, Muller podría quedar convertido para siempre en un paria a ojos de los escépticos. En la entrevista que reproducimos a continuación, el físico deja bien claro que eso no le preocupa lo más mínimo.

Como físico de formación, ¿cómo llegó a interesarse por el cambio climático?

Mi interés comenzó a partir de la relación entre la astronomía, la historia de la Tierra y la geología. Existe una teoría, la teoría de Milankovitch, que vincula las glaciaciones con causas de carácter astronómico. Durante largo tiempo, sin embargo, el interés por esa clase de relaciones ha sido ajeno a la ciencia. Es astrología, ¿verdad? La gente piensa que el futuro se encuentra escrito en las estrellas. Y creo que ese fue el motivo por el que el campo suscitó tan poca atención. Los diez años que pasé inmerso en esa disciplina culminaron con la publicación de un libro técnico: *Ice ages and astronomical causes* [«Glaciaciones y causas astronómicas»; Springer, 2000], una obra con gran cantidad de detalles técnicos y matemáticos. Por supuesto, cada vez que daba una conferencia sobre el tema, la mitad de las preguntas se referían al cambio climático. Así que decidí prepararme para responder a esas preguntas y comencé a estudiar en detalle el problema del calentamiento global. Todas las herramientas que había desarrollado y todos los métodos que había aprendido eran aplicables a ese nuevo campo.

Pero la verdadera razón por la que me lo tomé en serio se debió a la sensación de que, aunque se trataba de un asunto de enorme importancia, gran parte del discurso público ignoraba la ciencia. Se recomendó que incluso las naciones más pobres destinaran una parte sustancial de su producto interior bruto a cuestiones relacionadas con el calentamiento global; el asunto estaba influyendo en las decisiones principales sobre política energética en Estados Unidos, y todo ello a pesar de que la ciencia no parecía haber llegado a ninguna conclusión definitiva. El problema me impactó como si fuera el más importante que un físico pudiera afrontar.

¿Cómo nació el proyecto BEST?

Uno de mis compañeros me llamó la atención sobre el debate planteado por Anthony Watts, quien hizo notar que muchas de las estaciones que registraban las temperaturas habían sido mal emplazadas, pues se hallaban próximas a construcciones y otras fuentes de calor. También supe del trabajo de Steve McIntyre, quien examinó los datos del «palo de hockey» [apodo que recibe una gráfica de temperaturas elaborada en 1999, la cual muestra unos valores aproximadamente estables durante unos mil años y luego asciende de manera drástica en el siglo xx].

Revisé el artículo en el que se deducía la gráfica y quedé con muy mal sabor de boca. Me pareció que sus conclusiones no se hallaban suficientemente justificadas. Algunos años más tarde, McIntyre demostró que el «palo de hockey» era incorrecto: contenía un error de bulto en el método que los autores habían empleado para calcular las componentes principales [una técnica estadística]. Así que me alegré de haberlo revisado.

Había otras cuestiones también. Tres grandes grupos de investigación se encargaban del análisis de los datos de temperaturas y las preguntas comenzaban a surgir. Una de ellas era por qué habían utilizado solo una pequeña fracción de todas las estaciones disponibles. Indagamos un poco y descubrimos que lo hacían porque sus métodos estadísticos eran adecuados para un número reducido de estaciones y funcionaban mejor si estas contaban con un registro largo y continuado. Así que escogían las estaciones cuyos registros satisfacían esas características.

La cuestión daba pie a una pregunta muy válida: ¿había un sesgo intrínseco al seleccionar estaciones con registros largos y continuados? La posibilidad existe, puesto que si tomamos una estación que lleva cien años en funcionamiento, puede que al principio se hallase en un medio rural y, más tarde, el entorno se hubiera urbanizado, lo que arrojaría un calentamiento anómalo. Este fenómeno se observa, por ejemplo, en algunas estaciones de Tokio. Se trata de un efecto denominado «isla urbana de calor».

«La razón por la que me tomé en serio el tema del cambio climático fue la sensación de que gran parte del discurso público ignoraba la ciencia»

Los tres grupos de investigación aseguraban que aquello no suponía ningún problema. Y puede que tuvieran razón. Nos resultaba muy difícil evaluarlo, así que pensamos que, gracias a los ordenadores modernos, podíamos diseñar un sistema que emplease todos los datos disponibles para abordar desde otra perspectiva los problemas conocidos, como el de la isla de calor. No tenía por qué ser un método mejor, pero sí distinto.

Así es como se trabaja en el ámbito científico. No siempre podemos asegurar que nuestros métodos superen a los existentes, pero siempre es posible proceder de otra manera y ver si llegamos a la misma conclusión. Si obtenemos una respuesta diferente, aparece la pregunta de por qué es así y podemos abordar esa cuestión. En una disciplina como esta, hacer las cosas de otra forma supone un gran beneficio.

¿Piensan lo mismo los otros grupos que analizan las temperaturas?

Nos pusimos en contacto con ellos y yo diría que hubo un acuerdo universal en que emplear un método distinto podría ayudar. Jim Hansen [del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA], por ejemplo, acogió con entusiasmo nuestro proyecto, ya que pensaba que obtendríamos la misma respuesta que ellos. Lo cual está muy bien. Ese tipo de confianza solo la posee la gente que realiza su trabajo con sumo cuidado.

Anthony Watts, a quien algunos climatólogos consideran no solo un escéptico, sino un negacionista del cambio climático, le ha criticado por comparecer en público antes de disponer de los resultados definitivos. ¿Por qué compareció?

La idea de que no deben enseñarse los resultados a nadie, ni siquiera a tus compañeros de profesión, hasta que no hayan pasado por un proceso de revisión experta es un concepto nuevo en el ámbito científico. Y se trae a colación debido a la atención de los medios. En mi opinión, no es positivo.

El problema se complica aún más cuando a alguien como a mí se le pide que hable ante el Congreso. Yo no me presenté voluntario. Estuve a punto de negarme. Lo discutí con mis colaboradores y la mayoría me dijeron: «Es el Gobierno. Es importante. Si no les das tu opinión más sincera y tu reflexión más honesta, aprobarán leyes ajenas al estado actual de la disciplina».

Dados los comentarios favorables que había hecho sobre los críticos a la climatología, como Watts y McIntyre, ¿cree que le llamaron a declarar porque el presidente del comité, Ralph M. Hall, pensaba que se posicionaría en contra de opinión mayoritaria?

Antes de mi comparecencia se publicaron artículos en periódicos de prestigio que afirmaban que yo era tendencioso y que me movían ciertos intereses. No sé de dónde sacaron esa idea. Aunque me lo puedo imaginar: creo que intentaban predecir mis conclusiones para restarles importancia cuando las hiciera públicas.

No voy a especular sobre las motivaciones del presidente republicano del comité. Después de haber declarado ante el Congreso, tengo la impresión de que la mayoría de sus miembros son personas serias y reflexivas, y que si tienen un punto de vista contrario al que se considera dominante es porque hay escépticos legítimos que han planteado cuestiones que no han recibido una respuesta clara.

Me da igual hablar con un republicano o con un demócrata. La ciencia no es partidista. Y mi refugio es atenerme a la ciencia. No me rijo por ningún programa y no existe ninguna razón política que me haga afirmar esto o aquello. Me atengo a la ciencia; creo que es eso para lo que valgo. Y si digo algo inesperado, lo considero positivo. Contribuye al debate.

Usted ha declarado en más de una ocasión que ninguna medida que EE.UU. tome para reducir las emisiones cambiará nada, debido a la rapidez con la que aumentan las emisiones de carbono de India y China.

Es un hecho. Si reducimos las emisiones pero continúan aumentando las de China e India, nuestras medidas no habrán servido para nada. La esperanza reside en convertirnos en un ejemplo que China e India puedan imitar. Pero muchos presentan el problema de un modo persuasivo, por razones políticas, como si fuéramos los responsables de un terrible calentamiento global y debiéramos reducir las emisiones con independencia de lo que otros hagan. Eso es ignorar los números.

¿Se considera un escéptico del cambio climático?

No, no en la manera en que se emplea el término. Me considero escéptico en el sentido en que lo es todo científico; pero, por desgracia, muchos confunden «escéptico» con «negacionista». Hay negacionistas del cambio climático. No mencionaré sus nombres, pero se sabe quiénes son. Se trata de personas que ignoran la ciencia, que se limitan a escoger los datos que les interesan y luego los presentan de manera incorrecta para afirmar que no concluyen nada de nada.

Entre los escépticos de verdad incluyo a gente como Watts y McIntyre, quienes, en mi opinión, ofrecen un gran servicio a la comunidad, se hacen preguntas legítimas y realizan un gran trabajo desde diferentes perspectivas. Todo eso forma parte del proceso científico.

Pero usted ha sido muy crítico con los que podríamos llamar «abogados» del cambio climático.

Se me ha citado acusando a Al Gore y a [Thomas L.] Friedman [columnista de *The New York Times*] de haber exagerado. Son personas tan preocupadas por los peligros del cambio climático que también ellos escogen los datos que les interesan sin atender demasiado a la ciencia que hay detrás. Lo que no resulta sorprendente: no son científicos.

Pero eso no es hacer ciencia. Un científico ha de considerar todos los datos y llegar a una conclusión equilibrada. Estoy seguro de que ellos obran de ese modo porque el asunto les preocupa profundamente y pienso que han logrado un beneficio real al alertar al público estadounidense sobre una cuestión que debe conocer. Pero, al no ser científicos, creen que no tienen por qué mostrar los datos discordantes. Para la opinión pública, Gore es un científico. Lo peligroso es exagerar, porque la gente acabará por descubrir la exageración y reaccionará en consecuencia.

¿Una reacción de qué tipo?

Creo que parte de los motivos por los que hoy en día el interés de los estadounidenses por el cambio climático está disminuyendo se debe a que la opinión pública ha reaccionado ante exageraciones previas. El público es el jurado y escucha a ambas partes. Pero cuando la gente oye resultados tan dispares, se aturde. En estos momentos, creo que la opinión pública se encuentra confundida porque ha visto que algunas de las cuestiones suscitadas por los escépticos eran válidas.

¿Considera que el IPCC, uno de los actores principales en climatología, es una institución legítima?

El IPCC [el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático] lleva a cabo ciencia muy legítima. El problema reside en que las cuestiones planteadas por el IPCC que más han llamado la atención han sido sus mayores exageraciones. Y ahora, cuando se afirma que el IPCC aún se halla básicamente en lo cierto, la gente no piensa en los datos de las temperaturas ni en las simulaciones por ordenador; la gente se acuerda de las exageraciones, como que el Himalaya se está derritiendo.

Los resultados que describió ante el Congreso en marzo eran «preliminares», basados en un pequeño porcentaje del conjunto total de datos. Cuando haya terminado, ¿volverá al Congreso?

Si me piden que vuelva a comparecer, me veré en problemas. El Congreso me pedirá que lo haga, de eso estoy casi seguro. Así que, ¿qué debería hacer? Que me aconseje la comunidad científica: ¿qué hace uno cuando su país le pide que cuente todo lo que sabe sobre el cambio climático?

Michael D.Lemonick *es periodista científico en Climate Central, una organización imparcial y sin ánimo de lucro sobre periodismo y climatología.*

PARA SABER MÁS

Física para futuros presidentes. Richard A. Muller. Antoni Bosch, 2009.
The instant physicist: An illustrated guide. Richard A. Muller. W. W. Norton, 2010.
Proyecto BEST: **www.berkeleyearth.org**
Página web de Richard A. Muller: **muller.lbl.gov**
Transcripción del discurso de Muller ante el Congreso de EE.UU.: **berkeleyearth.org/Resources/Muller_Testimony_31_March_2011**



Nadadores hidrodinámicos y eficientes, los rorcuales (como este rorcual azul) se hinchan enormemente durante la alimentación. Llenan su cavidad oral extensible con toneladas de agua y presas, y después filtran y expulsan el agua a través de las barbas o ballenas que tapizan sus mandíbulas.

Jeremy A. Goldbogen obtuvo su doctorado en zoología por la Universidad de la Columbia Británica. Ahora es investigador posdoctoral en la Institución de Oceanografía Scripps de la Universidad de California en San Diego.



ZOOLOGÍA

La buchada perfecta

Nuevos dispositivos arrojan luz sobre la biomecánica de la alimentación en los rorcuales, los mayores mamíferos marinos

Jeremy A. Goldbogen

Un rorcual hambriento se sumerge a cierta profundidad en el océano para ejecutar una serie de aceleraciones y, con la boca totalmente abierta, se precipita sobre una densa masa de presas. En cada uno de los asaltos o arremetidas, la ballena ingiere en pocos segundos unos diez kilogramos de krill, contenidos en los 70.000 litros de agua que se traga (una cantidad mayor que su propio peso). Durante una arremetida, la ballena hace oscilar la cola y la aleta caudal para acelerar su movimiento y abre la boca unos 90 grados. La resistencia que se genera fuerza la entrada de agua en la cavidad oral del cetáceo, que posee repliegues que le permiten expandirse hasta un volumen cuatro veces superior al de reposo. Cuando las mandíbulas del rorcual se cierran, la enorme masa de agua absorbida se hace patente: el cuerpo adopta el aspecto de un «renacuajo hinchado». En menos de un minuto, toda el agua acumulada se filtra y sale de la bolsa gular distendida, que al deshincharse lentamente deja las presas dentro de la boca. A lo largo de varias horas de alimentación continuada, una ballena puede ingerir más de una tonelada de krill, lo bastante para proporcionarle la energía que necesita durante un día.

Hace años, Paul Brodie, del Instituto de Oceanografía de Bedford, en Canadá, describió el método de alimentación de los rorcuales como «la mayor acción biomecánica del reino animal». Esta estrategia la presentan en exclusiva los rorcuales, una familia de ballenas de barbas (Misticetos) entre las que se incluyen especies como la yubarta, o ballena jorobada, y los rorcuales común y azul. Como todos los misticetos, los rorcuales son filtradores (o suspensívoros). Separan los pequeños crustáceos y peces presentes en el agua absorbida me-

EN SÍNTESIS

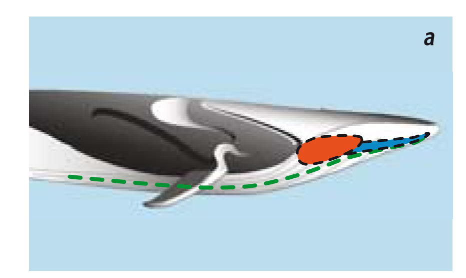
Los rorcuales presentan una estrategia de alimentación singular: se sumergen en profundidad y, mediante una serie de arremetidas, ingieren una enorme cantidad de agua con krill, con lo que aumentan en gran medida su volumen corporal.

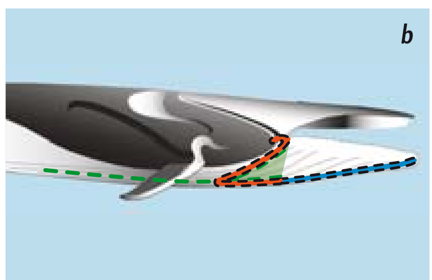
La alimentación mediante arremetida se basa en mecanismos morfológicos y físicos peculiares. La entrada de agua se ve facilitada por el gran tamaño del cráneo y las mandíbulas, además de una cavidad bucal muy extensible. Asimismo, se ha demostrado un mecanismo activo de absorción de agua que permite reducir la fuerza máxima experimentada en la cavidad bucal.

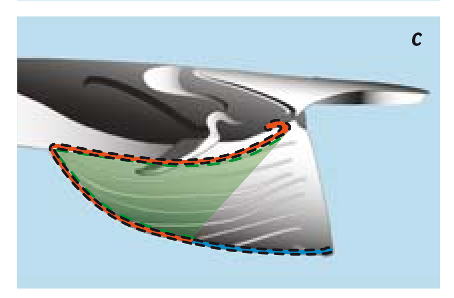
El enorme consumo energético que conlleva la alimentación mediante arremetida ha impuesto un límite superior al tamaño del cuerpo de los rorcuales y de otros animales marinos semejantes.

RANDY MORSE, GOLDENSTATEIMAGES.COM

diante las barbas o ballenas, las placas de queratina (la misma proteína que forma el pelo, las uñas y el caparazón de las tortugas) que penden de la parte superior de la boca. Al alimentarse de agregaciones densas de presas, los misticetos alcanzan un tamaño corporal enorme: las ballenas se cuentan entre los mayores animales que jamás hayan vivido. La alimentación de arremetida de los rorcuales resulta insólita no solo por el enorme volumen de agua incorporada, sino también por los mecanismos morfológicos y físicos que hacen posible este comportamiento extraordinario.







En una ballena en reposo (*a*), la lengua (*rojo*) se recoge a lo largo del suelo de la boca (*azul*) y el *cavum ventrale* se halla plegado (*línea de trazos verde*). Cuando el rorcual traga agua y presas (*b*), la lengua deformable ejerce presión sobre el *cavum ventrale*, y el saco oral empieza a expandirse (*verde*). En la máxima expansión (*c*), la lengua se invierte y se aplasta para formar una gran parte de la pared del saco oral; el suelo de la boca se extiende asimismo para formar parte de la cavidad.

AMERICAN SCIENTIST

Debido a las dificultades logísticas de estudiar la alimentación de arremetida de los rorcuales bajo el océano, nuestro conocimiento de este proceso se limitaba, hasta hace poco, a observaciones realizadas en la superficie del mar. Durante los últimos años, mi equipo ha logrado progresos al respecto. Hemos obtenido datos únicos generados por transpondedores digitales fijados al dorso de rorcuales, con los que hemos cuantificado los movimientos de los animales durante un episodio de alimentación de arremetida. Hemos determinado también las fuerzas físicas implicadas en el proceso y el volumen de agua ingerida. Se han corroborado así las predicciones realizadas con anterioridad por otros investigadores sobre la base de conocimientos anatómicos y de observaciones en la superficie del agua. Además, nuestros análisis han descubierto nuevos mecanismos de ingreso de agua que, a su vez, nos han llevado a estudiar las notables adaptaciones morfológicas asociadas a la alimentación de arremetida.

CABEZAS GRANDES Y LENGUAS INVERTIDAS

Los estudios pioneros sobre la alimentación de arremetida, realizados en los últimos decenios, se centraron en la maquinaria anatómica que hace posible esa conducta. Los rorcuales muestran una serie compleja de adaptaciones morfológicas en la cabeza, la boca y la garganta. La cabeza parece más propia de un reptil que de un mamífero; su forma le permite hacer frente a la vez a las exigencias opuestas de ingestión de agua y de locomoción. Un rorcual ha de tener una boca grande y distensible con el fin de ingresar un gran volumen de agua. Pero después ha de poder contraerla y cerrarla para mantener una forma hidrodinámica que reduzca la resistencia al avance y permita una natación regular eficiente, en particular durante las inmersiones prolongadas o la migración a grandes distancias.

En las especies mayores de rorcuales, el cráneo y las mandíbulas presentan un gran tamaño; constituyen casi el 25 por ciento del cuerpo. Las mandíbulas se hallan conectadas a la base del cráneo mediante almohadillas gigantescas de una matriz densa y elástica de fibras y cartílago que están impregnados de aceite. Este tipo de articulación mandibular solo existe en los rorcuales y tal vez en una especie próxima, la ballena gris. La articulación ofrece una conexión flexible entre el cráneo y las mandíbulas, lo que posibilita una abertura de casi 90 grados. Esta característica resulta necesaria para incorporar una gran cantidad de agua durante una arremetida: aunque el área de la boca es muy grande, la proporción del área que captura presas viene determinada por el ángulo de abertura entre el cráneo y las mandíbulas.

El cráneo del rorcual posee asimismo una tercera articulación, la sínfisis mandibular, que conecta las mandíbulas en el centro del maxilar inferior. En algunos mamíferos esta conexión se halla fusionada, pero en los rorcuales también tiene una composición de fibrocartílago que aumenta la flexibilidad. Con esta tercera articulación, las mandíbulas fuertemente curvadas pueden girar hacia afuera y aumentar la superficie de la boca. La rotación mandibular suele observarse en los rorcuales que se alimentan en la superficie del mar; también en especímenes muertos, en los que los músculos que mantenían las mandíbulas en su lugar se han soltado.

La entrada rápida de una gran cantidad de agua se ve facilitada además por un mecanismo de lo más insólito: una lengua que se invierte y forma un espacioso saco oral para acomodar el agua en la parte ventral del cuerpo. La lengua del rorcual es muy fláccida y deformable. Aunque presenta algunas características estructurales propias de la lengua de los mamíferos, está muy poco muscularizada y se halla compuesta en gran parte de tejido graso elástico. Además, existe un espacio intramuscular, el *cavum ventrale*, situado entre la base de la lengua y las paredes de la cavidad bucal, que se extiende desde allí hasta el ombligo de la ballena. Durante la entrada de agua, la lengua se invierte en el *cavum*: al retirarse a través del suelo de la boca y retroceder hasta el ombligo, forma el gran saco oral que acoge el agua.

La extrema distensión de la cavidad bucal durante la entrada de agua plantea un problema en las paredes del cuerpo, que en los cetáceos está compuesta por grasa rígida y tejido conjuntivo firme. Todos los rorcuales poseen una serie de surcos longitudinales en la capa de grasa ventral que cubre casi la mitad del cuerpo, desde el hocico hasta el ombligo. De hecho, la palabra «rorcual» proviene del término noruego *röyrkval*, que significa «ballena de surcos». Esta grasa ventral acanalada (GVA) está constituida por crestas duras separadas por canales profundos de tejido elástico delicado; cuando se la ve en sección transversal, presenta una arquitectura parecida a un acordeón que se extiende con facilidad si el músculo subyacente se relaja. La tremenda capacidad de ingreso de agua de los rorcuales depende claramente de este diseño morfológico único. Pero no

solo resulta notable la estructura de la GVA, sino también su comportamiento mecánico.

GRASA Y MÚSCULO SUPEREXTENSIBLES

El primer descubrimiento importante sobre la biomecánica de la alimentación de arremetida llegó a finales de la década de los ochenta del siglo XX, gracias a los experimentos de Lisa Orton y Paul Brodie. A partir de muestras frescas de GVA de rorcual procedente de una estación ballenera de Hvalfjördur, en Islandia, realizaron pruebas mecánicas en el tejido para determinar la tensión que podía soportar cierta cantidad de carga. Encontraron que la GVA y las capas musculares asociadas podían aumentar hasta varias veces su longitud de reposo y recuperar después la forma original. Esa extensibilidad extraordinaria se atribuía a la elastina, una proteína elástica especializada presente en todo el tejido, y al hecho de que la GVA, en ausencia de tono muscular, se desplegaba como un paracaídas.

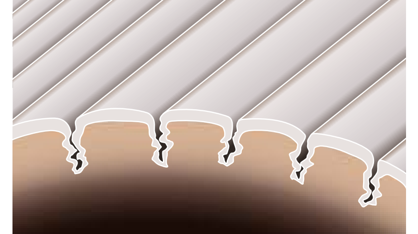
La extensibilidad de la GVA resulta fundamental en la captación de una gran cantidad de agua y presas. Además, la fuerza necesaria para dilatar el tejido nos informa de la velocidad que debe alcanzar la ballena para ejecutar una arremetida con éxito. Cuando un rorcual acelera y abre sus mandíbulas, se genera presión dinámica dentro de la cavidad oral y contra el suelo de la boca. En teoría, la presión dinámica por sí sola bastaría para extender por completo la GVA e hinchar la cavidad bucal, pero solo si la velocidad de natación fuera lo bastante elevada. Al comparar la cavidad bucal con un cilindro de paredes delgadas, Orton y Brodie calcularon que una velocidad de arremetida de tres metros por segundo sería suficiente para llenarla. Dicha predicción se aproximaba a las observaciones realizadas en la superficie del mar, pero hasta fecha reciente no había manera de medir con precisión la velocidad de natación durante una arremetida.

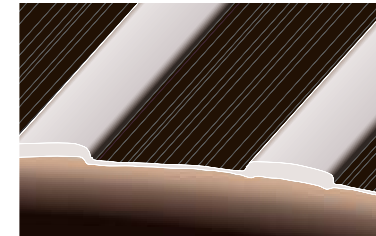
ARREMETIDAS EN LAS PROFUNDIDADES

Casi dos decenios después del estudio de Orton y Brodie se pudieron comprobar por fin sus estimaciones mediante el examen del movimiento, o cinemática, de los rorcuales en ambiente natural. Bill Burgess, de Greeneridge Sciences, desarrolló un transpondedor digital de gran resolución que podía fijarse temporalmente al dorso de las ballenas cuando estas salían a la superficie para respirar. Los transpondedores, equipados con ventosas para su fijación y con un dispositivo de flotación para poder recuperarlos, contenían varios sensores, entre ellos un hidrófono, un transductor de presión y un acelerómetro. Los transpondedores nos ofrecieron datos preliminares sobre el comportamiento subacuático de los rorcuales, como la orientación del cuerpo, las veces que la ballena nadaba y las que se deslizaba, y la profundidad de la inmersión. La aplicación de los transpondedores mediante una larga pértiga de fibra de vidrio no es una tarea trivial: requiere muchos años de experiencia en el mar y un esfuerzo coordinado entre un buque de apoyo y un bote menor de marcado.

Las operaciones de marcado las dirigían John Calambokidis y Greg Schorr, del Colectivo de Investigación Cascadia de Olympia, en Washington, y Erin Oleson, de la Institución de Oceanografía Scripps. En los veranos de los últimos ocho años, se realizaron estudios de marcado en varias localidades cerca de la costa de California y de México. Los datos de los transpondedores demostraron que muchos rorcuales ejecutaban inmersiones profundas consecutivas, en algunos casos hasta los 300 metros de profundidad. Al final de esas inmersiones, se registraban una serie de meneos u ondulaciones. Cada ondulación iba acompañada de una tanda de movimientos de natación activa y de una reducción concomitante en el ruido del flujo de agua, lo que señalaba una desaceleración (algo que suele observarse en las arremetidas en superficie).







La grasa ventral acanalada (GVA) de un rorcual permite la expansión de la cavidad oral. Las crestas duras de la grasa, con su aspecto de acordeón, se hallan separadas por surcos profundos de tejido elástico delicado (*arriba*). En sección transversal, la GVA está constituida por capas de músculo, elastina, grasa y epidermis (*abajo, izquierda*). Los ensayos mecánicos han demostrado que la GVA puede expandirse más del doble de su dimensión habitual (*abajo, derecha*).

CORTESÍA DE NICK PYENSON (*fotografía superior*)/AMERICAN SCIENTIST

Aunque los datos insinuaban la existencia de arremetidas en profundidad, las pruebas directas llegaron de otro tipo de transpondedor con ventosa: el Crittercam de National Geographic, concebido y desarrollado por Greg Marshall. La cámara de vídeo instalada dentro del Crittercam estaba equipada con luz infrarroja, para grabar en la oscuridad durante las inmersiones profundas, y con un registrador de tiempo y profundidad. En las grabaciones de vídeo se observa el rorcual que nada a través de densos campos de krill al final de cada inmersión profunda. Las imágenes de uno de los Crittercam muestran la caída de la mandíbula inferior del rorcual seguida de una disminución del ruido del flujo y, después, una expansión de la grasa ventral acanalada. Representaba una prueba visual del comportamiento que habíamos deducido a partir de los datos registrados por nuestros transpondedores digitales: varias arremetidas consecutivas para capturar presas al final de inmersiones profundas.

Después de nuevos análisis, nos dimos cuenta de que podíamos utilizar el nivel de ruido de flujo registrado por el hidrófono del transpondedor para calcular la velocidad de natación del



Fijar un transpondedor electrónico a un rorcual azul en movimiento no es una tarea fácil. Aquí, un equipo de investigación de Cascadia coloca un transpondedor mediante una larga pértiga de fibra de vidrio (con permiso del Servicio Nacional de Pesquerías Marinas). El dispositivo de flotación rojo sobre el transpondedor facilita su recuperación una vez las ventosas suctoras del transpondedor se desprenden del rorcual.

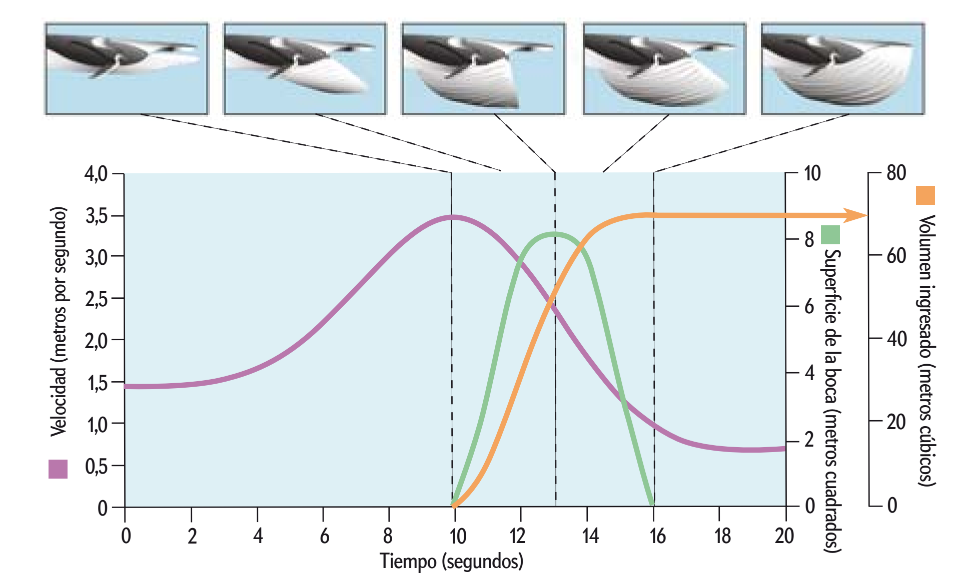
cetáceo durante cada inmersión. Ello puso de manifiesto los rápidos cambios de velocidad durante una arremetida. Curiosamente, el máximo valor registrado fue de 3 metros por segundo, justo la velocidad de flujo que Orton y Brodie calcularon que se necesitaba para hinchar de forma pasiva la cavidad bucal. Además, los datos revelaron una rápida deceleración del cuerpo aun cuando el rorcual continuaba nadando activamente, una indicación de que el cetáceo experimentaba una resistencia al avance muy fuerte cada vez que abría por completo la boca. Los datos cinemáticos de los transpondedores permitían, pues, determinar no solo la resistencia que se producía, sino también la cantidad de agua ingerida por la ballena.

GRANDES TRAGOS Y RESISTENCIA ELEVADA

Cuando un rorcual se precipita sobre una masa de peces y distiende la bolsa gular experimenta una reconfiguración importante del perfil normal del cuerpo, grácil y muy hidrodinámico. Como resultado se produce una gran resistencia al avance: al dirigirse el flujo de agua hacia las mandíbulas y expandirse la cavidad bucal, se reduce el impulso de la ballena y el cuerpo se decelera en poco tiempo. Por lo tanto, el tamaño y la forma de las mandíbulas tienen una gran influencia en la resistencia que se genera durante una arremetida. Puesto que las mandíbulas determinan el tamaño de la boca, también determinan en gran parte la cantidad de agua ingerida.

Tras reconocer la importancia de la forma del cráneo y de la mandíbula en la mecánica de la absorción de agua, Nick Pyenson, de la Institución Smithsoniana, Bob Shadwick, de la Universidad de la Columbia Británica, y yo nos dispusimos a medir tantos ejemplares de cetáceos en los museos como fuera posible. Al integrar las medidas morfológicas con los datos cinemáticos de los transpondedores, pudimos calcular el volumen de agua captada durante la arremetida de un rorcual. Con la máxima abertura de las mandíbulas, estimamos que la cavidad bucal permitiría la entrada de unos 20 metros cúbicos por segundo. Al final de una arremetida de seis segundos de duración, el agua acumulada ascendía a unas 60 toneladas, resultado que apoyaba de nuevo las estimaciones de Paul Brodie en 1993. La masa de agua incorporada tiene el tamaño aproximado de un autobús escolar, una cantidad realmente enorme. La cantidad de agua resulta colosal si se compara con la masa corporal del cetáceo, que pesa unas 45 toneladas.

Al incorporar un volumen de agua superior al de la propia masa corporal, se genera una tremenda resistencia al avance, lo que supone un gasto energético importante. La energía que el rorcual necesita para captar agua se triplica durante la arremetida, mientras que el aumento consiguiente de la resistencia hace que el gasto se quintuplique. El coeficiente de resistencia al avance constituye una medida de la hidrodinámica de un objeto y de su eficacia en reducir esa resistencia. Los coeficientes elevados suelen corresponder a formas poco hidrodinámicas, mientras que los valores bajos indican una forma muy hidrodinámica. Nuestros cálculos simples sugieren que, durante una arremetida, ese coeficiente aumenta en más de un orden de magnitud. Así, un rorcual que se alimenta experimenta una transformación extrema, desde un cuerpo hidrodinámico hasta otro que presenta una extraordinaria resistencia al avance. Resulta interesante que los máximos coeficientes registrados en los rorcuales se asemejen a los medidos en el hinchado de un paracaídas. La analogía entre ambos sistemas es lógica: ambos han de reconfigurarse con el fin de generar resistencia. En otras palabras, los paracaídas necesitan resistencia al avance para hincharse y hacer más lenta la velocidad de caí-

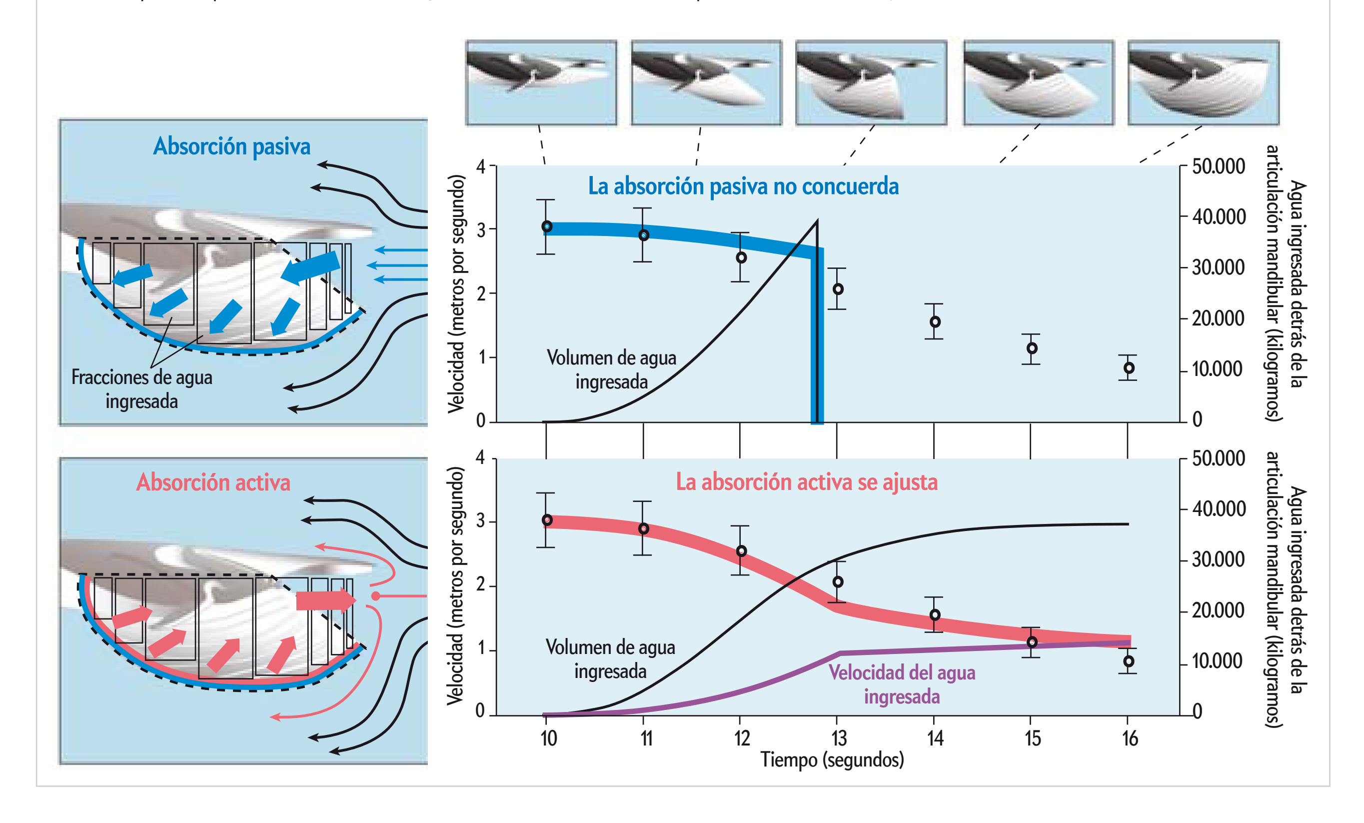


Los datos de los transpondedores electrónicos de los rorcuales han permitido descifrar la mecánica de la alimentación mediante arremetida. Después de sumergirse a cientos de metros de profundidad y de acelerarse (*púrpura*) para atrapar un cardumen de krill, el rorcual abre la boca (*verde*), lo que causa una gran resistencia al avance y deceleración. La cavidad oral se llena de agua (*naranja*) y el cetáceo cierra la boca. Entonces empieza a expulsar el agua, al tiempo que la filtra, y a prepararse para la siguiente arremetida.



¿Funciona una ballena como un paracaídas?

Un rorcual que se alimenta mediante arremetida transforma su cuerpo hidrodinámico en otro que presenta una extraordinaria resistencia al avance, de modo comparable a la resistencia que se genera durante el hinchado de un paracaídas. Se planteó entonces la pregunta de si el animal expandía la cavidad oral de modo pasivo (*arriba, izquierda*), igual que sucede en un paracaídas, o bien controlaba de forma activa el proceso, es decir, utilizaba la musculatura para impulsar lentamente el agua hacia delante durante una arremetida (*abajo, izquierda*). Se realizaron simulaciones de la trayectoria del animal para calcular la velocidad de la ballena durante una arremetida. Si se consideraba una absorción pasiva (*línea azul, gráfico de arriba*) los resultados de la simulación no concordaban con los datos registrados por los transpondedores electrónicos (*puntos blancos con las barras de error*). Sin embargo, las simulaciones con una absorción activa (*línea roja, gráfico de abajo*) producían un buen ajuste.



da, mientras que los rorcuales requieren esa resistencia para hinchar la cavidad bucal.

BALLENAS Y PARACAÍDAS

Cuando nos dimos cuenta de que la arremetida de los rorcuales conllevaba una enorme resistencia al avance, buscamos una colaboración insólita: la de Jean Potvin, físico de paracaídas de la Universidad de Saint Louis, en Missouri. Juntos desarrollamos un nuevo modelo sobre la alimentación de los rorcuales, más detallado, inspirado en los estudios realizados durante decenios sobre el hinchamiento de paracaídas. A partir de una morfología y una velocidad de arremetida inicial, el modelo calculaba la desaceleración del rorcual asociada a la resistencia que se generaba durante la captación pasiva de agua. A continuación compararíamos los resultados del modelo con los datos empíricos de los transpondedores. En primer lugar nos preguntamos: ¿Se asemeja un rorcual que se alimenta a un paracaídas que se hincha? Si tal fuera el caso, un rorcual se hincharía «pasivamente», y el flujo que expande la cavidad bucal hallaría escasa resistencia debido a las propiedades de elasticidad extrema de la GVA.

Los resultados de la simulación de ingreso pasivo de agua en los rorcuales no concordaron con los datos de los transpondedores, simplemente porque el cuerpo no reducía la velocidad con suficiente prontitud. En otras palabras, no había suficiente resistencia al avance para explicar la elevada deceleración que habíamos observado en las ballenas con transpondedor. Ello significaba que el agua penetraba en la boca con demasiada rapidez y, como consecuencia, la cavidad bucal alcanzaba el llenado máximo hacia la mitad de la arremetida (cerca del momento en que la boca se abría por completo). La cavidad dejaba de llenarse porque la GVA no podía extenderse más. En ese punto, toda la masa de agua ingresada debería acelerarse de inmediato hasta la velocidad instantánea del cetáceo (dos metros por segundo), lo que impondría fuerzas desmesuradas sobre las paredes de la cavidad. Si la GVA no fuera lo bastante resistente para acomodar esas fuerzas, la absorción pasiva haría reventar la cavidad y se producirían efectos catastróficos. Si, de lo contrario, la GVA pudiera soportar esas fuerzas, la masa de agua ingresada rebotaría en la pared de la cavidad y saldría de nuevo por la boca antes de que las mandíbulas se cerraran. En cualquiera de los dos supuestos, la absorción pasiva no parece un mecanismo factible en los rorcuales. (Sin embargo, sí podría darse en arremetidas con ángulos de abertura bucal inferiores y volúmenes incorporados menores.)

AMERICAN SCIENTIST



Mandíbulas de un rorcual azul (*gris*) **y de un cachalote** (*amarillo*)**, del Museo de Historia Natural de la Institución Smithsoniana. El autor** (*que aparece dos veces en esta fotografía compuesta*) **realizó medidas de numerosos especímenes para estimar la cantidad de agua ingresada durante la arremetida de una ballena.**

CORTESÍA DE NICK PYENSON/*AMERICAN SCIENTIST*

Si la absorción pasiva resulta imposible, ¿cómo ejecutan los rorcuales una arremetida con éxito? Dos características anatómicas clave de la GVA sugerían un mecanismo de absorción muy distinto. En primer lugar, identificamos varias capas de músculo bien desarrollado, fuertemente unidas a la grasa acanalada. En segundo lugar, un estudio realizado por el equipo de Merijn de Bakker, de la Universidad de Leiden, reveló la existencia de mecanorreceptores, nervios sensibles a la tensión mecánica integrados en las capas de músculo y de grasa de la GVA. Se concentraban sobre todo en los surcos, la región del tejido que se dilata durante la entrada de agua. Esas dos características hacían pensar que los rorcuales podían estimar el volumen de agua ingresada a partir del grado de estiramiento percibido por el tejido, tras lo cual generaban la fuerza suficiente para empujar lentamente el agua hacia delante. Tal mecanismo es posible si los músculos de la GVA ofrecen una resistencia activa al estiramiento provocado por el flujo de agua entrante. En virtud de la tercera ley de Newton, o ley de acción y reacción, la ballena imparte su impulso al agua absorbida durante esta «colisión»; la ballena aminora su velocidad a medida que el agua entrante, que al principio se hallaba en reposo, aumenta la suya, y finalmente ambas velocidades se asemejan.

Cuando simulamos este tipo de absorción activa, hallamos una buena concordancia con el perfil de velocidad generado por los datos de los transpondedores digitales. El resultado del modelo apoyaba nuestra hipótesis de inflación activa en los rorcuales, un mecanismo muy distinto del que se observa en los paracaídas. Pero ¿por qué empujan los rorcuales el agua fuera de la boca, cuando lo que intentan es absorberla? De hecho, esta impulsión desde el interior de la cavidad bucal aumenta la resistencia al avance (razón por la cual la simulación de la absorción activa se ajustaba mejor a los datos de los transpondedores).

Aunque parezca contraintuitivo, impulsar el agua hacia fuera durante una arremetida ofrece algunas ventajas. El empuje gradual hacia delante distribuye las fuerzas de resistencia al avance a lo largo de más tiempo. Como consecuencia, la fuerza máxima experimentada por el aparato de absorción del agua se reduce.

Otra ventaja de la absorción activa es el aumento de la eficiencia energética y mecánica de la filtración por parte del rorcual. Si el agua se impulsa lentamente hacia delante, ya no hay que acelerar toda la masa de agua absorbida desde el reposo. Además, puesto que la trayectoria de la masa de agua absorbida en el interior de la cavidad bucal es en gran parte paralela a la superficie de filtración de las barbas, los rorcuales pueden realizar la filtración cruzada; este mecanismo arrastra el material perpendicularmente a través de la superficie del filtro para evitar que se obture.

LA ARREMETIDA TIENE UN PRECIO

La elevada resistencia al avance que hace posible la absorción de agua tiene consecuencias importantes en la ecología alimentaria y la morfología evolutiva de los rorcuales. No solo exige invertir mucha energía para acelerar la masa de agua ingresada, sino que sustrae a la ballena energía cinética y hace que el cuerpo casi se detenga. Como consecuencia, el cuerpo ha de acelerarse desde el reposo para ejecutar la arremetida siguiente. Mientras retiene la respiración al final de una inmersión, la ballena ha de arremeter una y otra vez antes de volver a la superficie para tomar aire y recuperarse. Los costes energéticos asociados a esa conducta restringen el tiempo que un rorcual grande aguanta en el fondo mientras se alimenta: unos 15 minutos por inmersión. Este período tan corto resulta inesperado, porque los rorcuales son muy grandes; en casi todos los demás vertebrados de respiración aérea, el tiempo de inmersión suele incrementarse con el aumento de tamaño debido a un metabolismo más eficiente.

Puesto que el tiempo máximo de inmersión está limitado por el elevado coste de la alimentación, los rorcuales dependen en especial de las agregaciones densas de presas. Además, se ha calculado que el diseño morfológico del rorcual permite captar el máximo de agua posible por arremetida. Ello explicaría por qué la cavidad bucal se extiende hasta la mitad de la longitud del cuerpo, hasta el ombligo, y las mandíbulas suponen casi la cuarta parte de la longitud del cuerpo. Pero ¿por qué el aparato de captación de agua no es todavía mayor? ¿Cuál es el límite de la capacidad de ingreso y cómo cambia esta con la longitud del cuerpo? Esas cuestiones me llevaron a consultar una serie de datos morfométricos publicados hacía tiempo sobre los cetáceos. Con ellos examiné las consecuencias de la escala y la morfología en el rendimiento de la alimentación mediante arremetida.

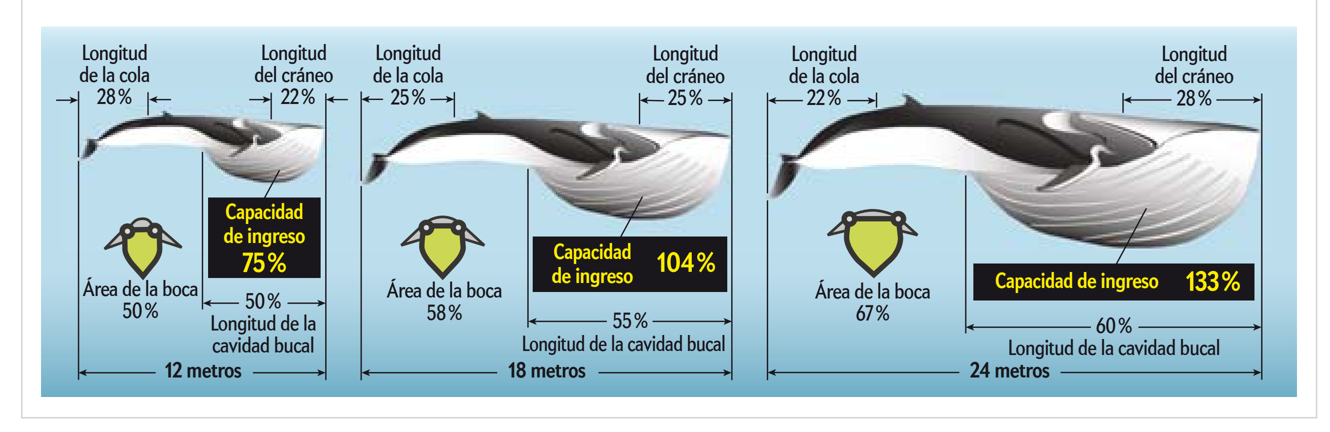
UN ASUNTO DE ESCALA

En los años veinte del siglo xx, en un intento de gestionar la industria ballenera, el Gobierno británico puso en marcha las Investigaciones Discovery, una serie de expediciones para conocer más a fondo la historia natural y la biología de las grandes ballenas en el océano Antártico. Un estudio en concreto se centró en las proporciones del cuerpo de las dos mayores especies de rorcuales, el azul y el común. No solo se trata de unos de los animales más grandes de todos los tiempos, sino que además muestran una amplia variación en lo que al tamaño corporal se refiere. Así, la longitud al destete del rorcual común y del azul es de unos 12 y 16 metros, respectivamente, mientras que el tamaño máximo registrado en cada especie es de 24 y 28 metros. Las expediciones recopilaron datos morfométricos, algunos de ellos relacionados con el aparato de captación de agua, de cientos de rorcuales comunes y azules de distinto tamaño corporal.

Los autores del estudio descubrieron un patrón peculiar: las ballenas de mayores dimensiones presentaban las mandíbulas y la cavidad bucal más grandes, en relación al tamaño del cuerpo. Al mismo tiempo, el tamaño de la parte posterior del cuerpo (la región desde la aleta dorsal hasta la cola, o *pedúnculo*

Crecimiento y cambio de proporciones

A medida que un rorcual crece, su cavidad oral (o bucal) no aumenta de manera lineal, sino que representa un porcentaje cada vez mayor de su tamaño corporal. De este modo, su morfología se optimiza para aumentar la capacidad de ingreso de agua. La longitud de la cavidad bucal pasa del 50 al 60 por ciento de la longitud del cuerpo, y la del cráneo, del 22 al 28 por ciento; mientras, la longitud de la cola se reduce del 28 al 22 por ciento de la longitud del cuerpo. La superficie de la boca aumenta del 50 al 67 por ciento de la superficie total proyectada del cuerpo, y la capacidad de ingreso asciende del 75 al 133 por ciento de la masa corporal. Aunque el cambio de proporciones (alometría) mejora la capacidad de ingreso de agua en las arremetidas, el aumento del consumo energético que ello conlleva ha impuesto un límite superior al tamaño del cuerpo de los rorcuales y de otros animales marinos semejantes.



caudal) resultaba menor. Los investigadores no podían explicar estos patrones extraños de crecimiento relativo, o alometría. Mi grupo reunió una serie de datos sobre los rorcuales con el objetivo de estimar la capacidad de captación de agua en función del tamaño corporal. Tal como esperábamos, el volumen relativo de agua ingresada aumentaba en función del tamaño del cuerpo, lo que se debía a la alometría del aparato de absorción de agua.

Pero, ¿por qué poseían las ballenas de mayor tamaño pedúnculos caudales relativamente menores? Planteamos la hipótesis de que esta reducción relativa de la cola representaría el coste de dedicar todos los recursos para el crecimiento a la parte anterior del cuerpo. A medida que los rorcuales crecen, su morfología se optimiza para aumentar la capacidad de ingreso de agua. El cráneo se torna más largo y ancho, en comparación con el tamaño total del cuerpo, con lo que la superficie bucal destinada a captar agua resulta también mayor. Además, la longitud del sistema de grasa ventral acanalada es relativamente mayor en las ballenas de gran tamaño, y ello aumenta de manera efectiva la capacidad de la cavidad bucal. Puesto que otros rorcuales grandes muestran las mismas pautas de crecimiento relativo, estas podrían representar una adaptación (o exaptación) que mejoraría el rendimiento de la alimentación mediante arremetida.

El menor tamaño de la cola no debiera disminuir el rendimiento de la natación en los rorcuales mayores, porque la aleta caudal (la superficie de propulsión que genera la fuerza utilizada para el impulso) suele ser proporcional al tamaño del cuerpo. Sin embargo, la mayor capacidad de ingreso de agua conlleva un coste. La cavidad bucal debe empujar hacia delante un volumen de agua superior, con lo que los rorcuales de mayor tamaño gastarán más energía para efectuar una arremetida con éxito. Este coste energético puede limitar aún más la capacidad de inmersión en los rorcuales mayores, ya reducida en comparación con otros animales. Supondría una desventaja, porque los cardúmenes de presas más densos tienden a situarse a gran profundidad. En teoría, a mayor tamaño corporal, la energía consumida con la alimentación de arremetida aumentaría más que la energía obtenida con esa estrategia.

Si esa situación se extrapolara a un rorcual gigante, más grande que un rorcual azul, hallaríamos que ese cetáceo hipotético no podría mantener el metabolismo con una alimentación a base de arremetidas. Aunque la alometría del rorcual mejorase la capacidad de ingreso de agua para una arremetida única, el coste asociado a ello dificultaría el acceso al alimento de las profundidades del océano. Según este razonamiento, hemos especulado que el aumento alométrico del consumo energético asociado a la alimentación de arremetida ha impuesto un límite superior al tamaño del cuerpo de los rorcuales. Es interesante pensar por qué no existe un animal más grande que un rorcual azul. Sin duda, se precisan más estudios para explorar esta hipótesis y otras relacionadas con las limitaciones de un tamaño corporal grande. La evolución puede haber modelado las dimensiones de estos mamíferos marinos, los mayores de todos, a su escala actual, pero las restricciones fisiológicas de la alimentación mediante filtración pueden haber impuesto asimismo un tope máximo al crecimiento.

PARA SABER MÁS

High feeding costs limit dive time in the largest whales. A. Acevedo-Gutiérrez, D. A. Croll y B. R. Tershy en *Journal of Experimental Biology*, vol. 205, págs. 1747-1753, 2002.

Insights into the underwater diving, feeding and calling behavior of blue whales from a suction-cup-attached video-imaging tag (CRITTERCAM). J. Calambokidis et al. en *Marine Technology Society Journal*, vol. 41, págs. 19-29, 2007.

Foraging behavior of humpback whales: kinematic and respiratory patterns suggest a high cost for a lunge. J. A. Goldbogen et al. en *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, págs. 3712-3719, 2008.

Skull and buccal allometry increase mass-specific engulfment capacity in fin whales. J. A. Goldbogen, J. Potvin y R. E. Shadwick en *Proceedings of the Royal Society*, publicado en línea, 25 de noviembre de 2009.

Passive versus active engulfment: verdict from trajectory simulations of lunge-feeding fin whales *Balaenoptera physalus*. J. Potvin, J. A. Goldbogen y R. E. Shadwick en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 6, págs. 1005-1025, 2009.

Sven Titz es doctor en meteorología y periodista científico.



FÍSICA ATMOSFÉRICA

Un meteorólogo en la segunda planta

Durante la puesta de sol, los astronautas de la Estación Espacial Internacional logran distinguir las distintas capas de la atmósfera. La troposfera, salpicada de nubes oscuras, brilla en colores amarillos y anaranjados. Por encima se encuentra la estratosfera, en tonos blancos y rosas. Esta capa se extiende hasta la región azul oscuro, donde comienza la mesosfera.

NASA

La estratosfera, considerada hasta ahora ajena a los fenómenos meteorológicos, ejerce una influencia notoria sobre los vientos y las temperaturas. Sus efectos se dejan notar en el invierno europeo y en los tifones asiáticos

Sven Titz

EN SÍNTESIS

Según las teorías tradicionales, el tiempo meteorológico se desarrolla en la capa inferior de la atmósfera. Allí se generan los flujos verticales, las turbulencias y las nubes.

Hace tan solo unos diez años se consolidó la idea de que la capa superior, la estratosfera, influye al menos de manera indirecta en el tiempo meteorológico.

La influencia de la estratosfera determina la severidad del invierno europeo, la trayectoria de los ciclones tropicales y torna en globales los efectos de las erupciones volcánicas.

Desde que el Concorde ya no la surca a toda velocidad, se diría que nos hemos olvidado por completo de la estratosfera, la segunda capa de la atmósfera terrestre. Su límite inferior se encuentra muy por encima de nuestras cabezas: a ocho kilómetros de altitud en los polos y a dieciséis en el ecuador. Si bien la mayoría piensa que el tiempo meteorológico constituye un fenómeno exclusivo de la troposfera (la primera capa de la atmósfera), se trata de una creencia errónea.

En el tiempo y sus turbulencias participan anticiclones y borrascas, calmas y tempestades, y, sobre todo, el agua en toda su variedad de formas. En la troposfera, la temperatura disminuye con la altura. En cambio, en la estratosfera el termómetro se mantiene estable a 55 grados centígrados bajo cero desde el límite inferior de la capa hasta los 20 kilómetros de altitud; después, la temperatura asciende hasta casi alcanzar de nuevo los cero grados en el límite superior, a unos 50 kilómetros de altitud. Como resultado, el aire de la estratosfera forma capas estables, como el agua de un lago en verano. Ello reduce la mezcla vertical e impide que penetre el vapor de agua. La estratosfera es más seca que cualquier desierto. No existe en ella ninguna nube que enturbie el cielo.

MEMORIA METEOROLÓGICA

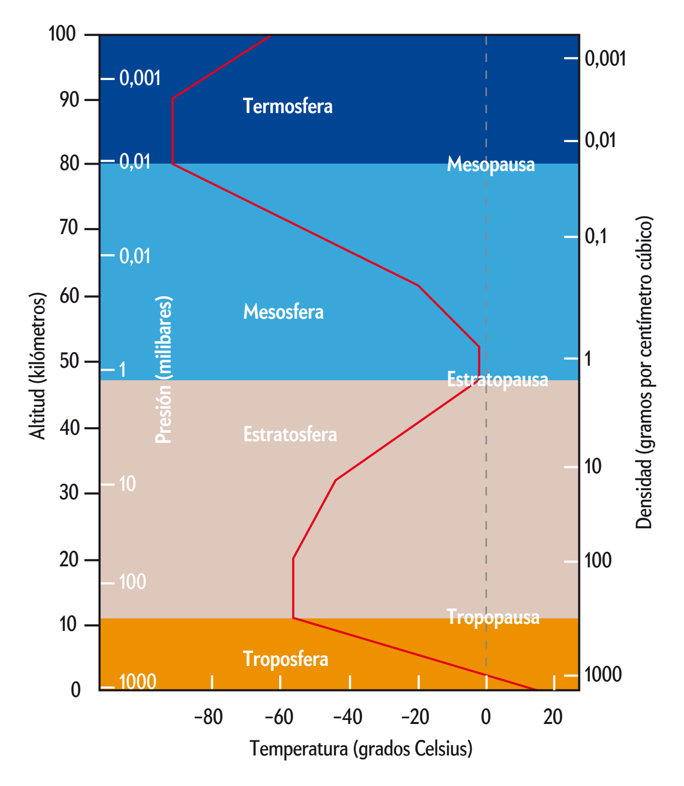
Durante largo tiempo prevaleció la idea de que, debido a su poca masa (una décima parte de la masa de la atmósfera) y su estratificación estable, la estratosfera no ejercía ninguna influencia sobre los fenómenos meteorológicos. Durante los años sesenta y setenta del siglo pasado, sin embargo, algunas investigaciones pusieron en duda este punto de vista.

En 1999, Mark P. Baldwin y Timothy J. Dunkerton, de la Asociación Investigadora Noroccidental, cerca de Seattle, indicaron que algunos cambios en la estratosfera sobre el Polo Norte se transmitían a la troposfera en cuestión de días o semanas. Desde entonces, ha aumentado el número de estudios destinados a entender en qué medida esta capa influye en el tiempo meteorológico. Según Theodore Shepherd, de la Universidad de Toronto, sí existe una influencia de la estratosfera, cuando menos indirecta: esta capa actuaría como una especie de «memoria» de la actividad en la troposfera.

El invierno del hemisferio norte nos ofrece el mejor ejemplo de ello. Cada año, al finalizar el otoño, se genera en la estratosfera sobre el Polo Norte un vórtice de proporciones gigantescas. Si bien este se mantiene estable durante la mayor parte del invierno, cada dos años de media aparecen perturbaciones que lo deforman y debilitan de manera considerable y, en ocasiones, llegan a fragmentarlo. Cuando eso ocurre, la temperatura de la estratosfera sobre la región polar llega a aumentar hasta 50 grados en apenas unos días.

Ese calentamiento estratosférico repentino fue descrito en 1952 por Richard Scherhag, de la Universidad de Berlín, quien descubrió el fenómeno gracias a sus experimentos con globos meteorológicos. Ulrike Langematz, del Instituto de Meteorología alemán e investigadora en el mismo grupo para el estudio de la estratosfera que fundara Scherhag, explica que tales incrementos súbitos de temperatura probablemente se deban a las ondas de Rossby de la troposfera. Estas ondas, que suponen un factor meteorológico fundamental en latitudes medias y altas, consisten en oscilaciones de viento y presión de gran tamaño que describen trayectorias circulares alrededor de los polos. La distribución de las zonas de alta y baja presión atmosférica se halla estrechamente ligada a los meandros de las ondas de Rossby, los cuales suelen medir unos mil kilómetros. Las ondas cortas se desplazan hacia el este con gran rapidez, las de longitud algo mayor proceden más despacio y, por último, las más largas permanecen fijas o incluso derivan hacia el oeste. Las ondas de Rossby ejercen también un efecto en la dirección vertical y, mediante un mecanismo no del todo conocido, pueden generar durante el invierno un calentamiento repentino en la estratosfera. En cuestión de días o semanas, ello provoca una alteración en la manera en que el aire circula en la troposfera.

Ese fenómeno afecta también a una oscilación atmosférica que condiciona el tiempo meteorológico en Europa durante el invierno: la oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), una fluctuación de la presión atmosférica sobre dicha región. Se trata de un factor de tal relevancia para nuestro tiempo invernal que los meteorólogos lo caracterizan mediante un índice. Este se calcula a partir de la diferencia de presión entre la depresión de Islandia y el anticiclón de las Azores, los agentes meteorológicos predominantes en Europa occidental. Para un índice positivo, la diferencia de presión entre Islandia y las Azores es elevada. Entonces se producen numerosas ondas de Rossby cortas y en Europa soplan fuertes vientos del oeste, procedentes de un Atlántico relativamente cálido. En consecuencia, el invierno se muestra benigno. Por el contrario, cuando el índice es negativo, la diferencia de presión resulta menor y las ondas de Rossby son de mayor longitud. En tal caso, el viento sopla en sentido contrario y pueden penetrar masas de aire frío procedentes del norte y el este en Europa central y occidental.



La temperatura (*curva roja*) **presenta una tendencia distinta en cada capa atmosférica. En la parte baja de la estratosfera, se mantiene constante. A partir de los 20 kilómetros de altitud comienza a aumentar y alcanza casi los cero grados en su límite superior.**

US STANDARD ATMOSPHERE/SuW-GRAFIK

El vórtice polar estratosférico hace fluctuar la oscilación del Atlántico Norte en una u otra dirección. Cuanto más vigoroso se muestra, mayor es el índice de la NAO. Pero si el vórtice se debilita, la estratosfera se calienta y el índice puede alcanzar valores negativos al cabo de días o semanas. En ese caso, las ondas de Rossby se alargan y se expanden hacia el norte y el sur, el cinturón de vientos del oeste serpentea más, y Europa y América del Norte se ven azotadas por olas de frío. Baldwin y Langematz recuerdan los meses de enero y febrero de 2009: tras un calentamiento estratosférico repentino, el Reino Unido sufrió una tormenta de nieve de intensidad excepcional. El tráfico en Londres quedó colapsado como consecuencia de una capa de nieve que superaba los 20 centímetros.

Hace tiempo que los servicios meteorológicos comenzaron a prestarle atención a este fenómeno invernal, pues reconocieron su potencial para mejorar los pronósticos y afinaron en consecuencia los modelos computacionales. Con anterioridad, la malla numérica de las simulaciones terminaba apenas encima de la troposfera. En la actualidad, esa malla se extiende mucho más lejos. El modelo que se emplea en la actualidad en el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo de Reading emplea una malla que llega hasta los 80 kilómetros de altitud; más allá, de hecho, del límite superior de la estratosfera. Gracias a unos modelos tan refinados, ahora ya resulta posible pronosticar con mayor fiabilidad los períodos fríos del invierno europeo.

Hasta aquí, cabría pensar que la estratosfera repercute de manera exclusiva en los inviernos del hemisferio norte. Nada más lejos de la realidad: también en el hemisferio sur se observa una relación similar entre la intensidad del vórtice polar estratosférico y el tiempo meteorológico.

Al respecto, un factor que no debemos pasar por alto es la capa de ozono estratosférico, sita a unos 40 kilómetros de altitud. En general, la interacción entre la estratosfera y la troposfera no se reduce a una cuestión de dinámica de fluidos. Tras absorber la radiación ultravioleta, el ozono se calienta y eleva la temperatura del aire. Por ello, los modelos computacionales que permiten estudiar en detalle la influencia de la estratosfera en nuestro tiempo meteorológico incluyen, en general, la interacción de la radiación con este gas.

Durante la primavera meridional, el agujero en la capa de ozono se abre en el vórtice estratosférico del Polo Sur, mucho más vigoroso que su homólogo en el hemisferio norte. El enfriamiento que sigue intensifica aún más el vórtice polar. Por esta razón, el cinturón de vientos del oeste en torno a la Antártida se ha extendido más hacia el sur en las últimas décadas. La capa estratosférica de ozono no solo ha adelgazado en la región del Polo Sur, sino en todo el planeta. Este hecho guarda relación con las interacciones entre la estratosfera y la troposfera, aunque los detalles son aún objeto de estudio.

En cualquier caso, la dinámica de la estratosfera puede estudiarse con gran precisión a partir de las variaciones en la distribución del ozono. Las medidas de la concentración de este gas estratosférico, efectuadas por satélites y globos meteorológicos, suponen una observación indirecta de la dinámica de las corrientes de aire a escala planetaria. Con un vórtice polar estratosférico débil, una cantidad considerable de ozono se desplaza desde los trópicos hacia los polos. Ante un vórtice intenso, sin embargo, ese flujo de ozono se detiene casi por completo. El fenómeno, conocido como circulación de Brewer-Dobson y del que volveremos a hablar más abajo, tiene lugar en ambos hemisferios.

HISTORIA

La exploración de la estratosfera

Hacia el año 1900, distintos instrumentos de medición a bordo de globos no tripulados pusieron de manifiesto la existencia de una segunda capa atmosférica superior a la troposfera. En julio de 1901, el lanzamiento del globo de los berlineses Reinhard Süring y Arthur Berson hasta una altitud récord de 10.500 metros demostró que los sensores automáticos no erraban. En 1902 se publicó el hallazgo decisivo: por encima de la troposfera, las temperaturas ya no descendían con la altura. La nueva capa recibió el nombre de *estratosfera*.

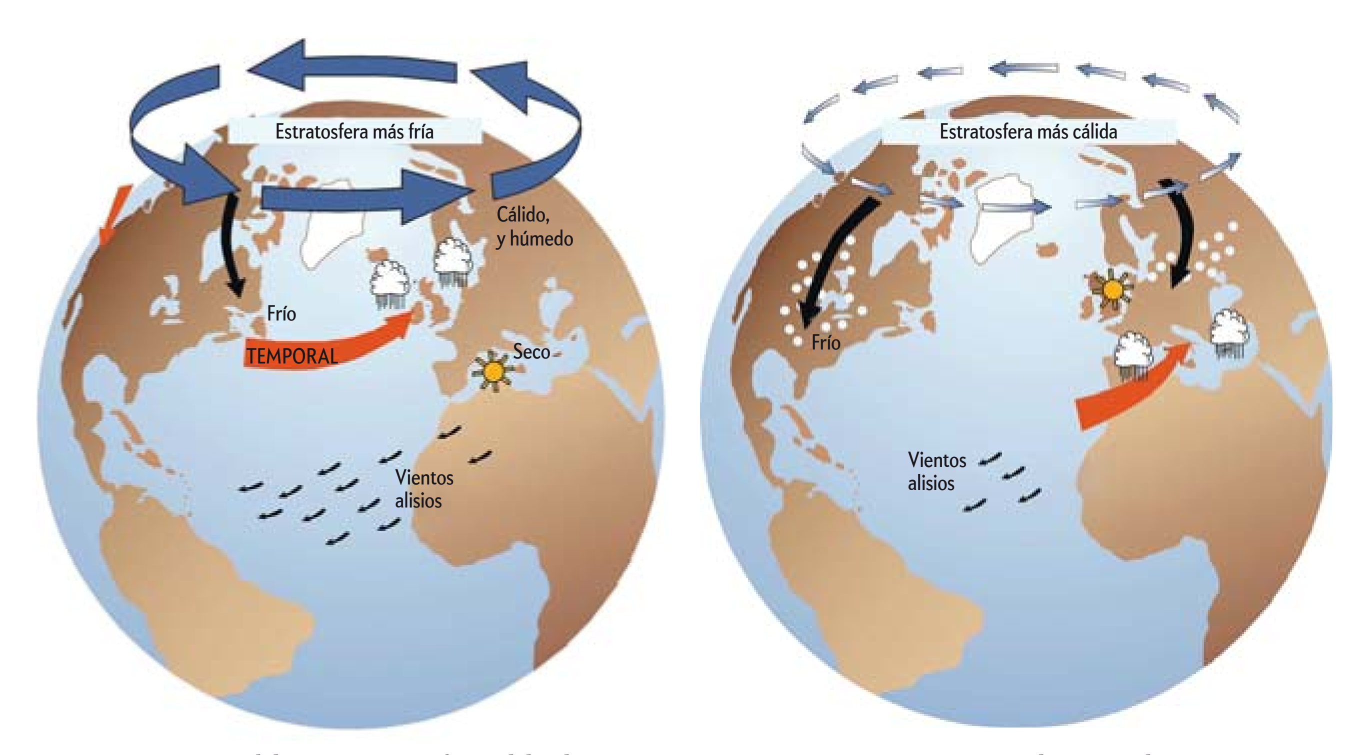
En los años siguientes a su descubrimiento se realizaron numerosos lanzamientos de globos no tripulados. La escasa densidad del aire impidió durante mucho tiempo que el hombre pudiera abrirse paso a alturas superiores a las alcanzadas por Süring y Berson. En la estratosfera, la densidad del aire asciende a unos 300 gramos por kilómetro cúbico, menos de un tercio del valor que toma en la superficie terrestre. En mayo de 1931, el investigador suizo Auguste Piccard viajó en una cabina presurizada colgada de un globo. Junto con su asistente, Paul Kipfer, alcanzó una altitud de 15.785 metros. Piccard y Kipfer no encontraron nubes a esa altura.

Debido a la baja densidad del aire estratosférico, no es de extrañar la ausencia de seres vivos a tales altitudes. En los últimos años, sin embargo, globos sonda enviados por la India han detectado en dicha capa algunas bacterias y hongos resistentes a la radicación ultravioleta.



Un globo de helio provisto de un instrumento para elaborar el perfil de la capa de ozono estratosférico despega desde la base estadounidense en la Antártida. Durante el ascenso, el globo se dilata de manera considerable. Es habitual el empleo de globos para este tipo de estudios, ya que pocos aviones de investigación disponen del equipo necesario para surcar un aire tan poco denso como el de la estratosfera.

NOAA.GOV



Las características del vórtice estratosférico del Polo Norte repercuten en nuestro tiempo meteorológico. Si el vórtice es intenso (*izquierda*), el invierno europeo resulta benigno, ya que entonces predominan los vientos del oeste. Un vórtice débil (*derecha*) puede causar olas de frío en América del Norte y Europa debido al descenso de masas de aire del norte.

UNIVERSIDAD DE WASHINGTON

CICLONES TROPICALES Y MONZONES

Aunque la influencia de la estratosfera sobre el tiempo meteorológico en las latitudes tropicales no resulta tan clara como en los polos, también en este caso ha quedado demostrada la existencia de un fenómeno que, sobre todo en verano, parece intervenir de manera decisiva en la meteorología. En 1961 se descubrió la existencia de una fluctuación en las corrientes de aire en la estratosfera, denominada oscilación cuasibienal (QBO). Comparada con otras oscilaciones atmosféricas, la QBO tiene lugar con la periodicidad de un reloj suizo, si bien su período de retorno resulta algo peculiar puesto que no se ajusta al ritmo exacto de los años, de ahí el apelativo «cuasi». Cada 28 o 29 meses, la dirección de la circulación en la estratosfera cercana al ecuador cambia dos veces: de oeste a este, y viceversa. En ambas fases, el viento puede soplar a velocidades superiores a los 180 kilómetros por hora. Se cree que, como consecuencia de la QBO, se producen intensas ondas atmosféricas. Dichas ondas se producirían, por ejemplo, a partir de nubes tormentosas que llegan a alcanzar el límite superior de la troposfera.

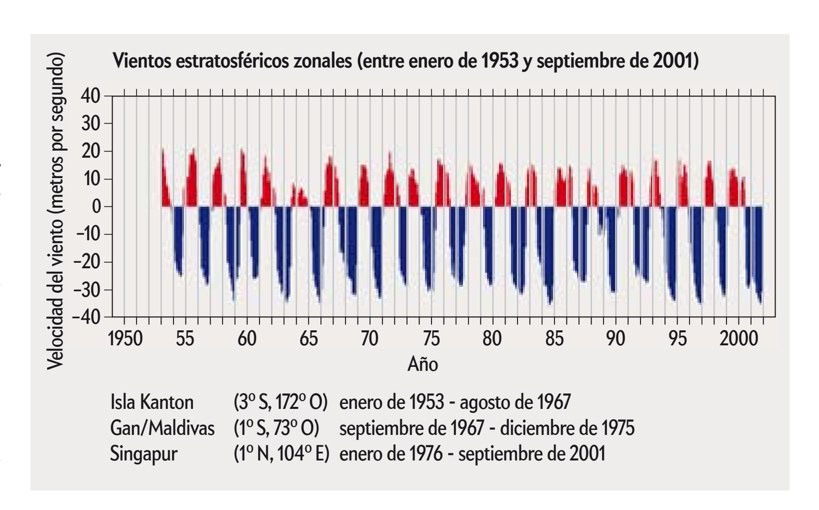
Desde hace ya largo tiempo se discute si la QBO ejerce o no una influencia sobre los ciclones tropicales. El fenómeno se ha venido incluyendo en algunos modelos estadísticos empleados para pronosticar la temporada de actividad ciclónica. Hace unos años se observó una relación entre la QBO y la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales en el Atlántico. No obstante, a falta de una relación más sólida, los meteorólogos no hacen mayores conjeturas por el momento.

No todos los océanos y sus correspondientes ciclones se muestran iguales. En 2009, Chang-Hoi Ho, de la Universidad Nacional de Seúl, y sus colaboradores advirtieron que las trayectorias de los tifones en el Pacífico Occidental dependían de la fase de la QBO, una conexión que apuntaba a una reacción en cadena de fenómenos meteorológicos. Por el momento, el equipo de investigación coreano ha puesto de manifiesto una interesante observación. Cuando en los trópicos dominan los vientos estratosféricos del este, aumenta de manera considerable la intensidad del viento con la altura (cizalladura del viento) sobre el Pacífico Noroccidental. Por el contrario, cuando el viento estratosférico sopla hacia el oeste, la cizalladura se muestra más bien débil. El efecto se transmite hacia la troposfera.

Una cizalladura intensa impide la formación de nubosidad tormentosa y chubascos, puesto que el viento se lleva las nubes. Por el contrario, una cizalladura menor hace que las columnas de nubes que aparecen como consecuencia del ascenso de masas de aire caliente y húmedo puedan subir con libertad, por lo que la presión atmosférica disminuye. De esta manera, la QBO influye en la distribución e intensidad de los anticiclones y las borrascas a escala regional. Es entonces cuando entran en juego los tifones: si en los trópicos dominan los vientos estratosféricos del este, el anticiclón sobre el Pacífico Noroccidental se intensifica y los ciclones se desplazan hacia el oeste. Cuando rigen los vientos estratosféricos del oeste, el anticiclón se debilita y los tifones se abren paso hacia el norte.

No se ha detectado en ningún otro océano una acción similar de la QBO sobre los ciclones tropicales. Según los investigadores coreanos, esto podría deberse a que el Pacífico Occidental es la región oceánica más cálida del planeta. En esta región se elevan masas de aire caliente y allí se desarrollan la mayoría de los ciclones tropicales. Esto facilita unas condiciones muy favorables para detectar una influencia de la QBO. A partir de sus resultados, Ho contempla la posibilidad de realizar pronósticos estacionales. En el caso particular de Japón, resultaría muy conveniente predecir la probabilidad de determinadas trayectorias. La regla general podría enunciarse así: durante la fase oeste de la QBO, los tifones tienden a producirse al oeste del archipiéla-

La dirección del viento en la estratosfera ecuatorial oscila de oeste a este y viceversa. Este cambio tiene lugar en un intervalo de 28 a 29 meses, por lo que ha sido bautizado con el nombre de oscilación cuasibienal (QBO). Los vientos del oeste, que soplan a una altura aproximada de 25 kilómetros, alcanzan una velocidad de hasta 20 metros por segundo. Los vientos del este pueden llegar a los 35 metros por segundo. La QBO influye en la trayectoria de los tifones del Pacífico Occidental.



go de Japón, mientras que en la fase este tienen lugar con mayor frecuencia en la región oriental.

Los expertos suponen que también el monzón indio guarda relación con la QBO. Las primeras hipótesis de este tipo se publicaron durante la década de los ochenta, si bien la conexión entre ambos fenómenos parece compleja. En 2007, Chantal Claud, de la Escuela Politécnica de Palaiseau, y Pascal Terray, de la Universidad de París 7, intentaron poner en orden un caótico conjunto de indicios. Descubrieron una correlación que presentaba cierto desfase en el tiempo: los vientos existentes a 40 kilómetros de altura en enero y febrero guardaban relación con la intensidad de las lluvias monzónicas en verano.

El proceso resulta complicado y aún carece de una explicación satisfactoria, aunque parece probable que la QBO actúe sobre los monzones de manera similar a como lo hace sobre los tifones. Claud y Terray estiman que su fase condiciona dónde y cuándo se genera la nubosidad que causa las lluvias monzónicas. Por ello, parece sensato utilizar datos referentes a la estratosfera en los modelos estadísticos que se emplean en los pronósticos. Aun así, muchos se muestran un tanto escépticos a la hora de afirmar si esta relación entre la QBO y el monzón indio seguirá observándose en el futuro.

VIENTOS ESTRATOSFÉRICOS Y VOLCANES

Las erupciones volcánicas no solo afectan al tiempo meteorológico en las áreas cercanas; su influencia se propaga a todo el planeta. Sin duda, el fenómeno se debe a la segunda capa de la atmósfera, que ejerce una función redistribuidora. Las nubes que emanan de una erupción pueden penetrar en la estratosfera. Además, si un volcán se encuentra en latitudes tropicales, cuenta con más posibilidades de afectar al tiempo a escala global, ya que las partículas se distribuyen en ambos hemisferios por efecto de la circulación de Brewer-Dobson, de la que hablábamos más arriba.

Como cabría esperar, no son las cenizas volcánicas las que ejercen una influencia significativa sobre el tiempo meteorológico, puesto que a los pocos días o semanas terminan por depositarse sobre la superficie. Las nubes de gas, por el contrario, pueden permanecer en la estratosfera durante años. En concreto, el dióxido de azufre reacciona con el ozono y el agua para producir gotas de ácido sulfúrico que reflejan los rayos solares hacia el espacio. Así, las erupciones volcánicas que inyectan grandes cantidades de ácido sulfúrico en la estratosfera pueden provocar un enfriamiento global. Este fenómeno se produjo por última vez tras la erupción del Pinatubo en Filipinas, en 1991. Especial fama adquirieron las erupciones del Krakatoa en 1883 y del Tambora en 1815, a las que se atribuyó un enfriamiento a escala planetaria. El año 1816 quedó recogido en los anales como el «año sin verano». Tanto fue así, que en Europa se produjeron hambrunas como consecuencia de los daños en las cosechas, si bien el frío de aquel año no se atribuye de manera exclusiva al Tambora, como a menudo se afirma. También en 1809

OTRAS CONSECUENCIAS

La estratosfera y el clima

Dado que la estratosfera afecta al tiempo meteorológico, también debería desempeñar un papel importante en los patrones climáticos. En particular, existen algunos aspectos del calentamiento global que los científicos no podrían explicar sin tener en cuenta esta capa de la atmósfera. Este es el caso de la influencia de las variaciones de la radiación solar sobre la temperatura: dichas variaciones resultan más intensas en la región ultravioleta del espectro, la cual es absorbida por la capa de ozono estratosférica. Sus efectos se propagan hasta la superficie.

La estratosfera también desempeñaría un papel relevante para el estudio del efecto invernadero antropogénico, debido al cual los meteorólogos auguran un calentamiento de la troposfera y un enfriamiento de la estratosfera. Aunque se han observado algunos indicios al respecto, las conclusiones definitivas quedan a la espera de nuevas mediciones y mejores simulaciones numéricas.

Por otro lado, y por baja que sea su concentración, no parece que pueda ignorarse la cantidad de vapor de agua estratosférico. Así lo revela un estudio de 2009 realizado por Susan Solomon, del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de Colorado, según el cual las oscilaciones climáticas de los últimos siglos podrían entenderse a partir de las variaciones de humedad en la estratosfera. Otras preguntas referentes a la influencia climática de la estratosfera se relacionan con el ozono. El tamaño del agujero en la capa de ozono influye sobre todo en el clima del Polo Sur; sin embargo, las consecuencias a escala global solo se conocen de modo parcial.

UNIVERSIDAD LIBRE DE BERLÍN



La estratosfera carece casi por completo de nubes. De manera excepcional, en las regiones polares se forman las denominadas nubes nacaradas. Estas se originan en condiciones de muy bajas temperaturas durante el invierno del hemisferio norte. Además de agua, las gotas de estas nubes contienen a menudo ácido nítrico o sulfúrico.

CORTESÍA DE ROSS J. SALAWITCH

tuvo lugar otra erupción cuyos efectos se dejaron sentir en todo el planeta.

Pero, como siempre, el diablo se esconde en los detalles. Las erupciones volcánicas no siempre han provocado un enfriamiento global. De hecho, los inviernos en Europa central y septentrional han sido, en ocasiones, más cálidos después de una erupción. Ello se debe a que la capa de ácido sulfúrico absorbe la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, un fenómeno que cobra especial intensidad en las latitudes cercanas al ecuador. Debido al calentamiento en los trópicos, aumenta el contraste de temperatura en la estratosfera entre las latitudes altas y bajas. Como resultado, el vórtice del Polo Norte se intensifica, el índice de la oscilación del Atlántico Norte se vuelve positivo y dominan los vientos del oeste, lo cual trae inviernos más moderados a gran parte de Europa. Algunos expertos presumen que las erupciones de El Chichón en 1982 y del Pinatubo en 1991 podrían haber contribuido, durante los años siguientes, a una intensificación de la fase con índice positivo, si bien no existen pruebas definitivas al respecto.

Los meteorólogos creen posible que la estratosfera interfiera también en el tiempo meteorológico por medio de otros procesos. Por ejemplo, algunas investigaciones sugieren una interacción entre la QBO y el fenómeno de El Niño, un calentamiento considerable en la región este del Pacífico tropical que, cada pocos años, desencadena una serie de acrobacias meteorológicas en todo el planeta. Tanto en este como en otros casos, por el momento carecemos de resultados concluyentes. Para ello se necesitarán datos más precisos y simulaciones numéricas más refinadas. Aunque aún es pronto para determinar con detalle la influencia que la estratosfera ejerce sobre el tiempo meteorológico y poder utilizarla en la elaboración de pronósticos, al menos una cosa ya es segura: los meteorólogos no subestimarán más la segunda planta de la atmósfera.

PARA SABER MÁS

Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. M. P. Baldwin y T. J. Dunkerton en *Science*, vol. 294, págs. 581-584, 2001.

Revisiting the possible links between the quasi-biennial oscillation and the Indian summer monsoon using NCEP R-2 and CMAP fields. C. Claud y P. Terray en *Journal of Climate*, vol. 20, págs. 773-787, 2007.

Raising the roof. T. Shaw y T. Shepherd en *Nature Geoscience*, vol. 1, págs. 12-13, 2008.

Influence of stratospheric quasi-biennial oscillation on tropical cyclone tracks in the western North Pacific. C.-H. Ho et al. en *Journal of Geophysical Research*, vol. 36, pág. L06702, 2009.

por Marc Boada

Marc Boada es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Tesoros en la arena

La arena de algunas playas contiene numerosos compuestos minerales y elementos químicos, cuya extracción es más sencilla de lo que pueda parecer

Llega el verano. Sentados en la playa, mientras disfrutamos de los contenidos de esta revista, podemos no reparar en que la cálida arena en donde reposamos, además de ser muy confortable, esconde un tesoro químico. Observémosla con atención: si es oscura y contiene partículas negras, vale la pena que acometamos una pequeña investigación científica.

La arena de la playa ofrece una muestra de la petrología de la región. En distintos lugares del litoral ibérico hallamos, pues, auténticos placeres metalíferos. Para detectarlos, basta pasar un imán sobre la superficie: de adherirse un buen número de granitos, seguramente habremos hallado magnetita y, por tanto, sabremos que en esa zona debe de haber una acumulación de otros minerales pesados que siempre la acompañan.

Para cazar ese tipo de tesoros, buscaremos playas próximas a grandes macizos de rocas ígneas o metamórficas, antiguas, surcadas por filones de pedernal o entreveradas con diques de pegmatita. En suma, terrenos en donde pueden esconderse criaderos minerales.

MARC BOADA

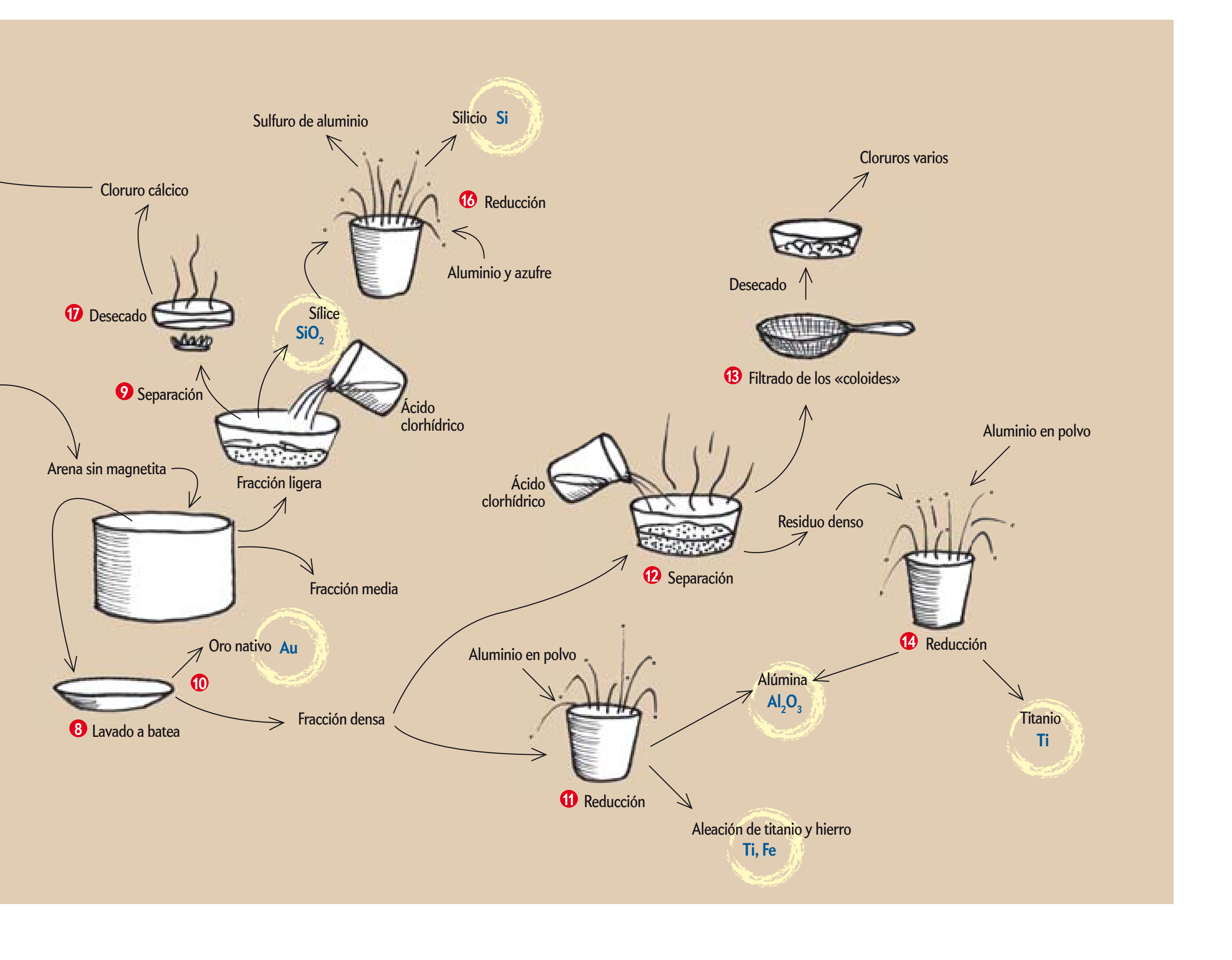
18 Electrolisis del cloruro fundido
Cl_2
Alúmina Al_2O_3
Hierro Fe
Calcio Ca
Aluminio en polvo
15 Reducción
Perdigones Pb
Conchas de carbonato cálcico $CaCo_3$
Restos orgánicos
7 Separación magnética
Magnetita Fe_3O_4
1 Recolección
Aguas madres
N S
2 Tamizado
Cloruros $NaCl + MgCl_2$
4 Filtrado y cristalizado
Arena
3 Lavado con agua caliente
5 Lavado con agua abundante
Agua con limos
6 Desecado durante 2 horas a 130 ºC

Yo he identificado zonas óptimas al sur de la entrega al mar de los Pirineos, en el litoral mediterráneo, también cerca del río Darro, en la provincia de Gerona, y en la desembocadura del Ebro. La bibliografía señala también otros puntos de la costa peninsular como la andaluza, la galaica o la cántabra. Asimismo, lo que sigue es también aplicable a los sedimentos fluviales —para los lectores que veranean en el interior.

Tras localizar una playa adecuada, ❶ tomaremos una pequeña muestra de arena de algún punto donde el imán señale una concentración notable de granos magnéticos. Bastarán un par de litros (unos 5 kilogramos). Una vez en casa, remedaremos a pequeña escala los procesos fisicoquímicos que utiliza la industria para obtener los elementos y compuestos que la integran. Por tanto, deberemos tomar precauciones extremas de seguridad: trabajaremos en un lugar ventilado, exento de materias combustibles, y utilizaremos siempre guantes, gafas, pantalla facial y mascarilla con filtros de carbono. Pensemos que la química es el arte de la limpieza (todo el material debe relucir), la rigurosidad (todo debe ser pesado, medido y anotado con precisión) y la perseverancia —como demostró Marie Curie, a quien este año homenajeamos con admiración infinita.

Volviendo a nuestro laboratorio, ❷ empezaremos por un primer tamizado de la arena. Mediante un colador de cocina o un cedazo, extraeremos los vegetales y las algas —que podemos eliminar—, y conchas, que reservaremos para más adelante y que constituyen nuestro primer compuesto casi puro, el **carbonato cálcico** ($CaCO_3$), en este caso de origen biológico. Es interesante comprobar que ya en esta fase del proceso de separación aparecen partículas grises muy densas, que, batidas sobre el yunque, se descubren como perdigones de **plomo** (Pb): he aquí nuestro primer elemento puro, de fuente antropogénica. Una vez tamizada la arena, ❸ la lavaremos con una cantidad mínima de agua muy caliente, que ❹ filtraremos con un lienzo y evaporaremos al sol hasta su total sequedad. Los bonitos cristalitos cúbicos que obtendremos corresponden a una mezcla dos nuevos compuestos, el **cloruro de sodio** (NaCl) y el **cloruro de magnesio** ($MgCl_2$), muy higroscópico y responsable último de que la mezcla se halle siempre algo húmeda. Para comprobar su composición, esparciremos una pizca de polvo de esos cristales sobre una llama, que en el acto se coloreará de amarillo, la firma espectroscópica del sodio.

Recogidas las aguas madres, ❺ lavaremos de nuevo la arena con agua abundante y la ❻ desecaremos bien, en el horno a unos 130 grados durante un par de horas. Una vez fría, procederemos más fácilmente a la ❼ separación de la fracción magnética.



La técnica es simple. Situamos un buen imán bajo una bandeja grande y lo sujetamos con los dedos. Introducimos luego un puñado de arena. Agitamos el conjunto para inmovilizar las partículas magnéticas y decantamos el resto. Si repetimos este paso varias veces, la separación será excelente: tendremos unos centenares de gramos de una arena muy pesada (la densidad aparente llega a 3 gramos por centímetro cúbico, o g/cm^3), bien negra, perfecta para obtener espectros magnéticos. Se trata, además, de un nuevo compuesto para añadir a nuestra lista, la **magnetita** u **óxido ferroso férrico** (Fe_3O_4), una excelente mena industrial para la obtención del hierro, cosa que nosotros haremos más adelante.

Prescindiremos por ahora de ese metal para buscar uno de mucha más enjundia. Ha llegado la hora de practicar un ❽ lavado «a batea», es decir, la selección gravimétrica que se consigue con el artefacto del mismo nombre. En ausencia de una auténtica batea podemos utilizar cualquier recipiente llano, de sección troncocónica y base circular; una jofaina o un *wok* pueden rendir buenos resultados.

Llenaremos con agua un gran barreño, que hará la función de un río aurífero, y buscaremos un taburete bien cómodo, ya que habremos de pasarnos algunas horas enfrascados en un trabajo emocionante pero monótono. El propósito será acumular en el fondo del plato, mediante movimientos circulares, pequeñas vibraciones y minúsculos vórtices, las partículas de mayor peso. Pondremos en la batea un puñado de arena y agua suficiente para que las partículas individuales adquieran gran movilidad; al poco de contonear el plato comprobaremos cómo grandes cantidades de partículas oscuras y muy densas se agrupan, sobrenadando encima las más ligeras. Con una pequeña ola, dejaremos caer estas en el fondo del barreño; periódicamente, ayudados por una cuchara o similar, retiraremos las más pesadas, que acumularemos en otro recipiente. Yo utilizo solo las partes del sedimento con un contenido más uniforme, las «fracciones de cabeza».

Después repetiremos el lavado con el sedimento ligero del que, al contrario que antes, extraeremos solo la parte más liviana. Obtendremos así tres fracciones: una de arenas oscuras con una densidad aparente de 2,7 g/cm^3; otra de tintas bien claras, con una densidad muy inferior, de unos 1,6 g/cm^3 y, por fin, la parte más importante pero menos útil, la fracción media poco seleccionada que usaremos como baño de arena para calentar o desecar los distintos productos que procesaremos.

La fracción ligera consta en su mayor parte de cuarzo y carbonato cálcico. Para ❾ eliminar este último, trataremos unos 200 gramos de la mezcla con ácido clorhídrico comercial —uno de los pocos ácidos que aún pueden comprarse sin dificultad—, que aportaremos en abundancia hasta que cese toda efervescencia. Obtendremos entonces dos nuevos compuestos: por un lado, unos 150 gramos de **sílice** (SiO_2) bastante pura; por otro, una solución de cloruro cálcico ($CaCl_2$) en ácido clorhídrico, cifras que fluctuarán en función de la procedencia del material.

Volvamos a la fracción densa. Si la lavamos otra vez con la batea, aparecerán de nuevo partículas voluminosas y grises: son los fragmentos de perdigones abandonados por algún cazador que ya hemos visto antes y que podemos reunir ahora para fundir en un único botón. Pero aquí no acaba todo. Si ❿ observamos con mayor atención, descubriremos unas diminutas partículas doradas, tan pesadas que restan inmóviles incluso cuando agitamos con energía el plato y provocamos pequeñas olas. Hemos hallado un nuevo elemento puro: **oro** (Au). Con un pequeñísimo pincel y algo de paciencia podremos recoger las pepitas microscópicas y guardarlas en un bote con agua.

Extraídos el plomo y el oro, buscaremos más elementos. ¿De qué debe estar hecho el sedimento pesado que hemos separado? En ciertos lugares hay arenas ricas en elementos raros, como el cerio y sus semejantes. Son las arenas monacíticas, que se explotan de forma intensiva en varios puntos del planeta. En España, en la costa atlántica.

Abundan también otros minerales pesados, en ocasiones notablemente radiactivos. Vale la pena por ello medir la actividad de cada una de las fracciones: comprobaremos que la densa es más activa



La reducción por oxidación nos permite ahondar en el contenido metálico de la arena. Este crisol de grafito protegido por un tubo de cuarzo contiene una parte de la fracción del sedimento denso mezclada con aluminio en polvo. Al calentar la base con un soldador y añadir un poco de polvo de magnesio, la mezcla se inflama alcanzando temperaturas superiores a los 2000 ºC. Una vez frío, podremos romper el crisol: hallaremos un régulo con un elevado contenido en titanio (*página opuesta*).

MOIRA COSTA



que la ligera y la magnética. Ello señala la presencia de elementos raros, pero lo normal son los compuestos de estaño, cromo o, como en el caso que he podido explorar, de hierro y titanio.

Para verificar el contenido metalífero procedamos a una ⓫ rápida reducción. Tomemos unos 45 gramos de sedimento denso, perfectamente seleccionado y con un mínimo de cuarzo. Lo secamos bien. Una vez frío, añadiremos una tercera parte (15 gramos) de aluminio en polvo bien fino, que habremos obtenido mediante el cribado del sedimento que abandona la lijadora tras un buen rato de erosionar una barra de aluminio puro y que habremos recolectado con el aspirador.

Mezclaremos los dos productos (sedimento y aluminio) en un bote de plástico. Agitaremos hasta que quede bien homogéneo. Lo pondremos luego en un crisol refractario, levemente hundido en la cima de un pequeño montón de arena. Con un soldador de gas lo calentaremos por la base con precaución y manteniendo una distancia prudente durante algunos minutos. A continuación, sin dejar de extremar las precauciones, dejaremos caer un poco de clorato potásico en la superficie de la mezcla y aplicaremos el soldador. Al instante, surgirá una potentísima luz, aderezada por una pertinaz lluvia de corpúsculos incandescentes, llegando el crisol al rojo blanco. Una vez frío, lo romperemos hasta localizar un régulo metálico recubierto de escoria, que corresponde a **alúmina** u **óxido de aluminio** (Al_2O_3), un compuesto tan duro que ralla el vidrio. El precioso botón, adornado por bellísimos colores de recocido y que tantos esfuerzos nos ha exigido, suele pesar solo una tercera parte de lo que pesaba la arena utilizada. Rompiéndolo sobre el yunque podremos estimar su tenacidad y observar su estructura cristalina.

Es curioso observar que de la fracción de arena densa no magnética se consigue una muestra metálica que se pega al imán con gran fuerza. El análisis que amablemente realizó Nuria Salan, de la Universidad Politécnica de Cataluña, demostró que se trataba de una aleación de **titanio** (Ti) y **hierro** (Fe), dos nuevos elementos que podemos añadir a la lista de componentes de la arena, aunque, eso sí, en forma de aleación y con muchísimas impurezas. Obsérvese que esos metales deben salir de un mineral que contenga ambos; vistos los datos, todo hace pensar que buena parte de ese sedimento denso corresponde a ilmenita, un óxido de hierro y titanio que no habíamos recogido con el imán por que a veces no es magnético.

Para ⓬ separar ambos metales antes de la reducción con aluminio procedí a atacar la fracción densa con abundante ácido clorhídrico —ojo con los vapores muy ricos en cloro—. Conseguí así una disolución de los cloruros, que luego sometí a electrólisis, sin obtener depósito alguno.

El ataque con clorhídrico había causado la formación de un cuerpo gelatinoso, que decidí investigar. ⓭ Lo separé mediante un filtro de lienzo fino: era una mezcla de cloruros de calcio, aluminio y magnesio. Aparecieron también partículas ligeras que, vistas al microscopio, mostraban una curiosa textura. Apartadas estas, quedaba todavía un resto oscuro que, ⓮ reducido una vez más con aluminio, se convirtió en un glóbulo menos magnético, con una composición quizá más rica en titanio —lo que todavía no he verificado.

Para cerrar el círculo, podemos ⓯ separar el hierro contenido en la magnetita mediante el mismo proceso de reducción que hemos aplicado a la fracción densa (⓫). O, más difícil, ⓰ extraer el silicio contenido en la arena que habíamos atacado con ácido. En este caso, utilizaremos una mezcla compuesta por nueve partes de arena silícea (que habremos pulverizado con un mortero metálico), diez de aluminio en polvo y doce de azufre. Tras mezclar bien los componentes, los colocaremos bien comprimidos en un crisol, que calentaremos hasta unos 100 grados centígrados (temperatura próxima a la de fusión del azufre); tras poner encima viruta de magnesio, clorato o permanganato de potasio, procederemos a la ignición.

Transcurrida la reducción, con el crisol ya frío, pulverizaremos el residuo con agua, lo que ocasionará un abundante desprendimiento de sulfuro de aluminio. Una vez hidrolizado el sedimento, lo atacaremos de nuevo con ácido clorhídrico, esta vez caliente, consiguiendo al fin unos pequeños régulos de **silicio** elemental (Si), impuro. Un nuevo elemento para la colección.

Si disponemos de un buen crisol de grafito, conductor eléctrico y que pueda calentarse con el soldador, podemos separar calcio metálico, un elemento que muy pocos han visto. Para ello retomaremos la solución de ácido clorhídrico con que habíamos atacado la arena silícea. Añadiremos las conchas machacadas que habíamos reservado al principio, hasta cesar toda efervescencia. ⓱ Evaporaremos a fuego lento hasta obtener una masa informe de cloruro de calcio, que, puesta en el crisol de grafito en donde habremos introducido un electrodo, también de grafito, calentaremos con el soplete, lentamente hasta la fusión. Para rebajar el punto de fusión, podemos añadir una pequeña cantidad (un 5 por ciento) del cloruro de sodio con una pizca del magnesio que habíamos obtenido al principio. ⓲ Mediante la aplicación de una fuente de alimentación (o batería) que pueda proporcionar algunos amperios, obtendremos por electrólisis un depósito de **calcio** metálico (Ca), que puede rasparse periódicamente del electrodo y que guardaremos sumergido en aceite mineral, ya que de otra forma regresará velozmente a algún estado de combinación.

Podemos también verificar la naturaleza de ese depósito tomando un pequeño fragmento acabado de obtener y poniéndolo en la llama del soldador. Al arder, emitirá las poderosas líneas rojas características del calcio, llamas de gran belleza que aderezan esta apasionante búsqueda de elementos escondidos.

De la arena sobre la que nos hallábamos disfrutando del verano habremos extraído, no sin ciertas penurias, riesgos y esfuerzos, elementos como silicio, calcio, hierro, plomo, oro y titanio, junto con compuestos bien variados, óxidos, sales y carbonatos, y siempre con la ayuda inestimable de grandes aliados como el aluminio, el cloro o el azufre.

MOIRA COSTA

por Agustín Rayo



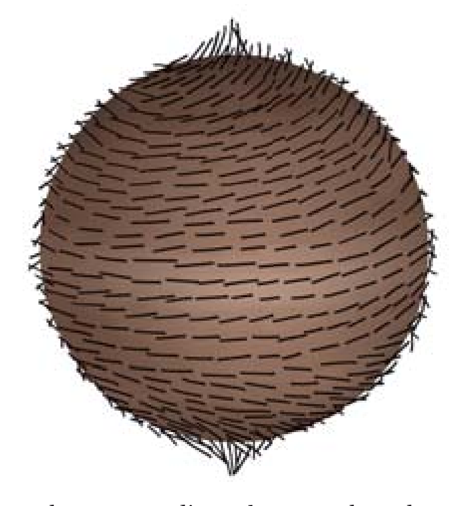
Agustín Rayo trabaja en el departamento de filosofía del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

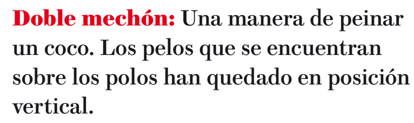
El teorema de la bola peluda

O sobre la imposibilidad de peinar un coco

Imagine un coco recubierto de pelo. Se trata de un coco ideal: una bola perfecta con un pelo en cada punto de su superficie. Ahora trate de *peinar* a su coco; es decir, intente orientar cada uno de sus pelos en alguna dirección. Nos interesan solo los peinados que, en jerga técnica, denominaríamos *continuos*: aquellos en los que dos pelos que nazcan lo bastante cerca siempre exhibirán orientaciones tan similares como deseemos.

Un peinado posible para nuestro coco es el «doble mechón». Para lograrlo, comenzaremos peinando todos los pelos que se encuentren sobre el ecuador hacia el oeste. Conforme pasamos a latitudes más cercanas a los polos, dirigiremos poco a poco la orientación de los pelos hacia el polo correspondiente, hasta que los pelos que se encuentran justo sobre cada polo hayan quedado en posición completamente vertical.

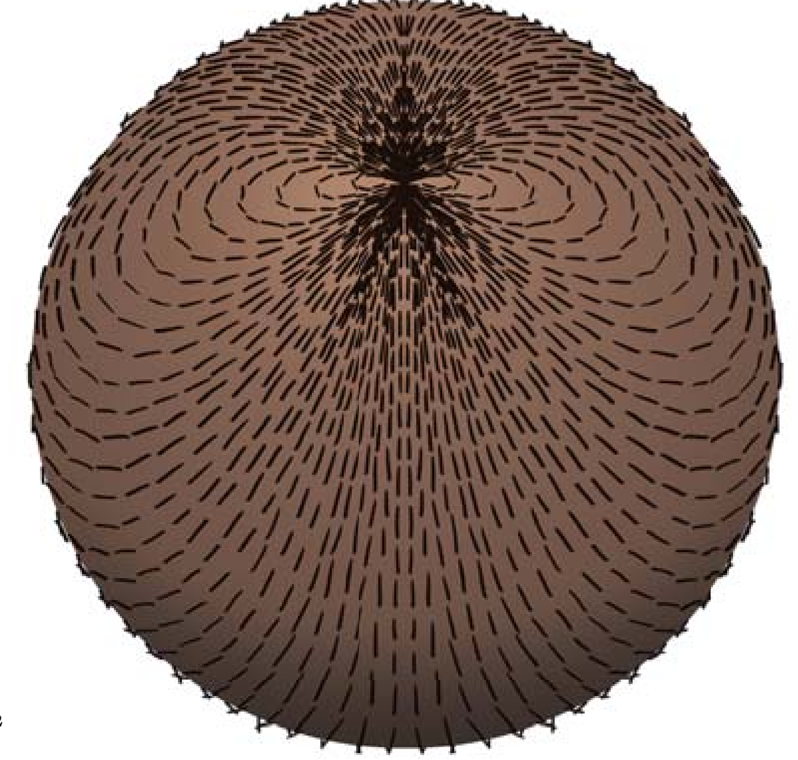




Doble mechón: Una manera de peinar un coco. Los pelos que se encuentran sobre los polos han quedado en posición vertical.

Como le confirmaría cualquier estilista, el doble mechón no se ve nada bien. Nos gustaría evitar los pelos verticales (aquellos que toman la dirección de la línea que une la raíz del cabello con el centro de la bola). ¿No existirá alguna manera de peinar nuestro coco sin que ningún pelo quedase en posición vertical (y sin abandonar nuestro compromiso de peinados continuos)?

No habría problema si estuviéramos dispuestos a conformarnos con un único pelo vertical. Tampoco tendríamos dificultades para peinar un toro (*dónut*) peludo, en lugar de una bola: en ese caso, podríamos peinar todos los pelos en dirección oeste. (*Ejercicio para el lector*: encuentre otras maneras de peinar un toro peludo de manera continua sin que queden pelos en posición vertical.)



Un solo mechón: Un tocado algo más complejo nos permite terminar con un solo pelo vertical. El teorema de la bola peluda, sin embargo, afirma que es imposible eliminar todos los mechones.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

El teorema de la bola peluda

Pero ¿qué ocurre si nos quedamos con la bola e insistimos en evitar los pelos en posición vertical? El *teorema de la bola peluda*, demostrado a finales del siglo XIX por el gran matemático Henri Poincaré, nos da la respuesta: es absolutamente imposible peinar una bola peluda de manera continua sin que quede por lo menos un pelo totalmente vertical. La formulación «oficial» del teorema trata sobre campos vectoriales en lugar de pelos:

> *Un campo vectorial tangente a la superficie de una esfera solo puede ser continuo si tiene ceros.*

Suena complicado, pero es bien sencillo. Imaginemos que en cada punto de la esfera anclamos una flecha y nos aseguramos de que, en dicho punto, la flecha tome una dirección tangente a la superficie; es decir, perpendicular a la línea que conecta ese punto con el centro de la bola. Este es nuestro campo vectorial tangente.

En cada punto, la orientación de la flecha nos indicará en qué dirección se

encuentra peinado el pelo. La longitud de la flecha, por otra parte, se relacionará con cuán vertical se encuentra el pelo: cuanto mayor sea la flecha, más pegado a la bola se hallará el pelo; si la flecha es de longitud nula, el pelo que ahí nace adoptará una posición vertical.

El teorema afirma que, si el campo vectorial es continuo —si flechas lo bastante cercanas adoptan orientaciones tan similares como deseemos—, entonces tiene que haber al menos una flecha de longitud nula.

Pelos y tornados

Ya discutimos una aplicación del teorema: la imposibilidad de peinar cocos sin que queden mechones. Pero existe otra aún más curiosa. Volvamos al enunciado técnico del teorema. Ahora la esfera será la superficie de la Tierra y las flechas indicarán la velocidad del viento: en cada punto, la flecha apuntará en la dirección horizontal del viento y su longitud será proporcional a la componente horizontal de la velocidad del viento.

Entendido así, lo que el teorema nos dice es que, siempre y cuando la velocidad del viento cambie de manera continua, existe al menos un punto sobre la Tierra en el que la velocidad horizontal del viento se anula. Algunas condiciones meteorológicas que satisfacen de manera trivial el teorema vienen dadas por la ausencia total de viento: si en ningún lugar de la Tierra sopla el aire, queda claro que existen puntos en los que la velocidad horizontal del viento se anula.

Pero otras condiciones mucho más interesantes provienen del equivalente eólico de uno de los mechones de nuestro coco: puntos en los que se genera una columna de viento vertical. El aire se desplaza hacia la columna pero, en cuanto hace contacto con la ella, comienza a ascender, por lo que su velocidad horizontal se anula.

La física atmosférica hace más probable que las condiciones del teorema se satisfagan por medio de *tornados*: los equivalentes eólicos de un mechón de pelo retorcido. En la vecindad de un tornado, el aire cercano a la superficie se desplaza en espiral hacia un «ojo» central; cerca del ojo, sube y su rapidez horizontal es prácticamente nula.

Podemos, pues, reformular el teorema de la bola peluda como *el teorema del tornado*: dados ciertos supuestos, la Tierra no puede verse libre de tornados en ningún momento.

El teorema del punto fijo

En 1912, el matemático holandés Luitzen Egbertus Jan Brouwer descubrió otra manera de demostrar el teorema de la bola peluda, pero con herramientas mucho más poderosas que las empleadas por Poincaré. Estas le permitieron ir más allá del resultado original y demostrar uno de los teoremas fundamentales de la topología algebraica.

Tomemos una bola e imaginemos una función f que envía cada punto (ya sea de la superficie o de su interior) a otro punto de la bola. Como siempre, supondremos que f es continua; es decir, que envía dos puntos lo bastante cercanos a dos puntos tan próximos entre sí como deseemos. El teorema del punto fijo de Brouwer afirma que, sea cual sea la función continua que consideremos, esta ha de tener al menos un *punto fijo*: existe al menos un punto que f manda a sí mismo.



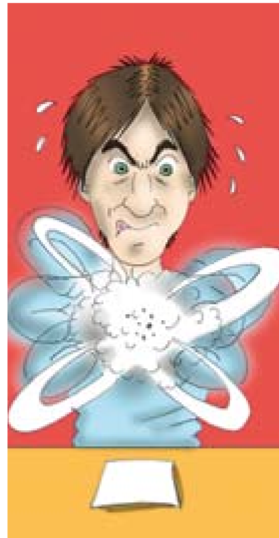
Toro peludo: **Al contrario que la esfera, sí resulta posible peinar un *dónut* sin que queden mechones.**

El resultado implica consecuencias sorprendentes. Imagínese agitando con fuerza una pecera con agua (y supongamos que el agua se mueve de manera continua). El teorema del punto fijo garantiza que hay al menos un punto en el líquido que terminará en el mismo lugar en el que comenzó.

El teorema puede generalizarse a bolas de cualquier dimensión. (En una dimensión arbitraria, una esfera se define como el conjunto de puntos que equidistan de un centro; la bola correspondiente incluye los puntos del interior.) Para una bola de dos dimensiones —es decir, un disco—, el teorema nos asegura que, para cualquier función continua, existe al menos un punto del disco que f envía a sí mismo.

Uno de los recuerdos más vívidos de mi primera clase de cálculo guarda relación con una aplicación del resultado anterior. Comience con dos hojas de papel del mismo tamaño. Tome una de ellas, arrúguela y aplástela todo lo que desee. Podemos asumir, incluso, que el papel es elástico y que usted puede estirarlo y encogerlo mientras lo arruga. Lo único que se le pide es que nunca lo perfore. Una vez que haya terminado, coloque el amasijo resultante sobre la segunda hoja, asegurándose de que ninguna porción de la hoja arrugada rebase el perímetro de la hoja prístina. Una consecuencia del teorema del punto fijo es que por lo menos un punto de la hoja arrugada habrá quedado sobre la vertical del punto correspondiente de la hoja prístina.







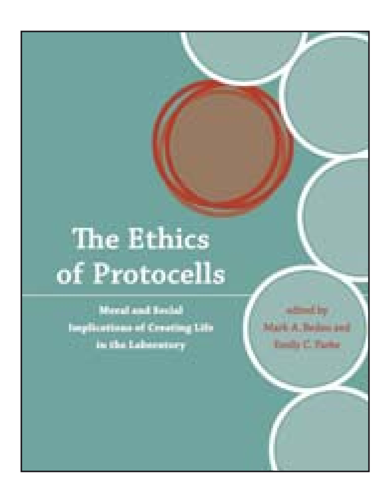
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

PARA SABER MÁS

Si quiere saber más acerca del teorema de la bola peluda, puede comenzar por: **en.wikipedia.org/wiki/Hairy_ball_theorem**

Para el teorema del punto fijo: **en.wikipedia.org/wiki/Brouwer_fixed_point_theorem**

El teorema de la bola peluda es un caso particular del teorema de Poincaré-Hopf. Puede encontrar una discusión muy accesible en **jdc.math.uwo.ca/M9052/vector-fields.pdf**



THE ETHICS OF PROTOCELLS. MORAL AND SOCIAL IMPLICATIONS OF CREATING LIFE IN THE LABORATORY.

Dirigido por Mark A. Bedau y Emily C. Parke. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 2009.

Biología sintética

Entre el poder y el deber

Las protocélulas son entidades microscópicas, autoorganizadas y dotadas de capacidad de evolución. Se ensamblan de manera espontánea a partir de componentes orgánicos e inorgánicos. Aunque artificiales, poseen vida. A la manera de otras entidades unicelulares, las bacterias, por ejemplo, se nutren con la materia y energía del medio, metabolizadas para su uso, reaccionan ante los estímulos del entorno, procuran permanecer vivas y satisfacer su necesidad, se reproducen y evolucionan. A diferencia de las bacterias, sin embargo, no son naturales, sino artificiales. De momento, sin embargo, existen solo en la mente del investigador. Mientras se logra convertirlas en realidad, los científicos laboran en la creación de potenciales sistemas de esa célula ideal, dentro del campo de la biología sintética, disciplina donde se funden química, ingeniería, biología molecular y biología computacional.

La biología sintética, que surgió una vez estandarizada la cartografía genómica, generalizadas las técnicas de síntesis de ADN y posibilitado el control de la función celular, se centra en el rediseño y fabricación de sistemas biológicos preexistentes, así como en el proyecto y creación de componentes y sistemas biológicos inéditos. Así, la genómica prostética sintética permite extraer información genética de una materia y transferirla para remediar un fallo genético en patologías humanas del ojo o del intestino. A ese tipo de transferencia se le denomina genómica prostética sintética. Pero podemos crear también elementos patógenos, devastadores de la salud pública, la agricultura, la ganadería o los ecosistemas.

Lo mismo que ha ocurrido con otros casos relacionados con la biomedicina —pensemos en los ejemplos cercanos de la clonación o las células madre—, la sociedad se muestra inquieta sobre los riesgos que entraña y los problemas morales que plantea. Muchas de las cuestiones reavivan las ya planteadas con las técnicas del ADN recombinante del decenio de los setenta. La preocupación por la bioseguridad de las Conferencias de Asilomar. De nuevo ahora, hay quien piensa que el debate moral frena el desarrollo de la técnica al generar un movimiento de opinión contrario a la biología sintética y propicio para una regulación restrictiva. De hecho, la nueva disciplina, herramienta clave para comprender el funcionamiento de la maquinaria celular, constituye la versión científica actualizada de un permanente problema filosófico, nuclear, el del lugar que el hombre ocupa en la naturaleza. Desde los presocráticos, la historia es un intento del hombre de domeñar la naturaleza y controlar su propio destino. La creación de vida es la forma más extrema de control sobre el mundo orgánico.

El proyecto de vida sintética constituye la expresión en el siglo XXI de un proceso de construcción que comenzó en el siglo XVIII, con los autómatas. (Aunque de estos hubo precedentes en la antigüedad clásica y en el apogeo del islam medieval.) Entre 1768 y 1774 aparecen los androides de Pierre Jaquet —Droz y su hijo, en Neuchâtel: una toca un instrumento musical, otro dibuja y un tercero escribe—. En 1828, con la producción artificial de urea, el primer compuesto orgánico sintetizado por el hombre a partir de materiales inorgánicos, se rompe con la idea de fuerza vital y con el hiato insalvable de lo vivo y lo inerte. Hace unos 100 años, en pleno debate sobre el vitalismo, los trabajos de Jacques Loeb y su equipo sobre partenogénesis artificial, la iniciación y desarrollo de un nuevo ser en ausencia de esperma, parecieron dejar zanjada la cuestión de la singularidad de la vida. Pese a todo, la vida no ha podido ser creada todavía a partir de la materia inerte.

Aunque la expresión biología sintética fue introducida por Stéphane Leduc, profesor de la Universidad de Nantes en 1912 (*La biologie synthétique*, París), los pasos firmes comenzaron a darse en los años sesenta con François Jacob y Jacques Monod, del Instituto Pasteur, descubridores de los fundamentos de la regulación genética. El primer circuito que ellos describieron constaba de un conjunto de genes que participaban en la digestión de la lactosa en la bacteria *E. coli*. El represor, un gen regulador, se encuentra activo en condiciones normales, manteniendo inactivo el metabolismo de la digestión de la lactosa. Cuando la lactosa se halla presente en el medio, la bacteria inactiva al represor.

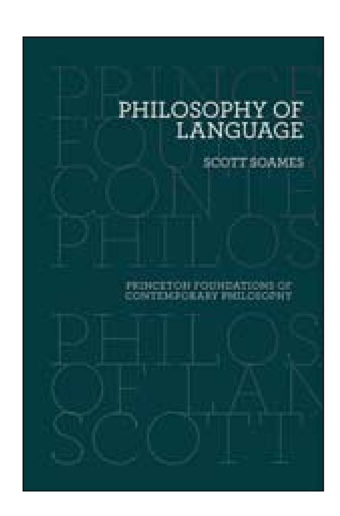
En 1989 se creó el primer ADN que contenía dos letras artificiales adicionales a las cuatro que existen en la naturaleza. Desde entonces se han desarrollado distintas variedades de ADN artificial. Seis años más tarde, Robert D. Fleischmann secuencia el genoma de *Haemophilus influenzae*, bacteria en la que Hamilton Smith había descubierto la enzima de restricción HindII, que resultaría clave en este ámbito. En el año 2002, apoyándose en la síntesis directa de ADN, se dio un paso importante hacia la posibilidad de acceder a virus, microorganismos y toxinas susceptibles de convertirse en armas de destrucción masiva: se fabricó un poliovirus funcional a partir de fragmentos de ADN solicitados por correo. Un año más tarde, Schultz y su grupo desarrollaron células que generaban aminoácidos artificiales, que conformaron nuevas proteínas.

Desde 2004, se vienen desarrollando congresos internacionales sobre biología sintética. La Comunidad Europea, por su parte, lanzó la Nest Pathfinder 2005/2006, cuyo documento de referencia insistía en que el nuevo paradigma de la ingeniería aplicado a la biología permitiría avanzar de una manera más racional y sistemática en la biotecnología. Preveía que la introducción de modularidad y estandarización de partes y dispositivos, junto con la adaptación de procedimientos preexistentes de diseño abstracto a sistemas biológicos, sumado a la aparición de nuevas técnicas que posibilitaran separar diseño y fabricación, cambiarían nuestras ideas sobre manipulación de los sistemas biológicos. La biología sintética resucitó en 2005 la cepa de la gripe de 1918 que mató a millones de personas. Su hito más conspicuo ha sido la síntesis del genoma de *M. mycoides* y su implantación en *M. capricolum*, creándose *Mycoplasma mycoides JCVI-syn 1.0*, que consta de 1.077.947 pares de bases. La próxima

meta, construir un genoma mínimo arquetípico para crear una célula mínima, con la mirada puesta en el futuro: diseñar y fabricar una especie totalmente nueva. Habrá que empezar por preparar circuitos genéticos, secuencias artificiales de genes que interaccionen entre sí de acuerdo con pautas complejas para producir los rasgos deseados.

Nunca plantearon dilemas éticos la mejora vegetal y animal. Pero sí otras manipulaciones eugenésicas, como la aplicada al hombre. Y en fecha más reciente, los transgénicos, organismos genéticamente modificados. En este caso, las bondades manifiestas de unos logros (producción bacteriana de insulina) contrastan con los daños acarreados por otros (el maíz y otras especies). No podemos controlar todos los procesos y aparecen efectos secundarios nocivos. El debate se aviva cuando se trata de construir un organismo a partir de piezas inertes. Los riesgos potenciales, en el caso de las protocélulas, derivan de dos propiedades clave. En primer lugar, puesto que se autorreplican, cualquier peligro que encierren se multiplicará a una escala ingente, conforme se vayan propagando y difundiéndose por el medio. En segundo lugar, porque evolucionan y sus propiedades podrían cambiar de forma imprevista. Tal vez, compitiendo con formas de vida existentes en la naturaleza. Ese potencial de evolución abierta pone de relieve que las consecuencias de crearlas serían imprevisibles. Los bioéticos se preguntan también si determinadas acciones manipuladoras no son transgresoras en sí mismas (modificar la conducta de animales superiores).

—Luis Alonso



PHILOSOPHY OF LANGUAGE,

por Scott Soames. Princeton Foundations of Contemporary Philosophy. Princeton-Oxford: Princeton University Press, 2010.

Filosofía del lenguaje

Pero no todo lo que es filosofía del lenguaje

Este libro de Scott Soames es básicamente una presentación de la filosofía del lenguaje de inspiración analítica en el que se pasa revista a la reflexión sobre el lenguaje de la corriente cuyos inicios se suelen poner en la obra de Gottlob Frege (1991) y que llega hasta la obra de D. Sperber y D. Wilson (1986). Aparte de una página de agradecimientos y una breve introducción, el meollo de la obra lo componen siete capítulos cuyos títulos, en castellano, son los siguientes: «El estudio lógico del lenguaje»; «Verdad, interpretación y significado»; «Significado, modalidad y semántica de los mundos posibles»; «Designación rígida, referencia directa e indexicalidad»; «La metafísica del significado: Proposiciones y mundos posibles»; «Aprioridad, aposterioridad y realidad», y «Los límites del significado». Además, se añaden una extensa y actualizada bibliografía y un índice temático y onomástico.

Como el lector habrá podido hacerse cargo por esta relación del contenido del libro, nos encontramos ante una obra que puede usarse muy bien a modo de manual de filosofía (analítica) del lenguaje, la semántica filosófica, o ambas, análogo, por lo demás, a otros libros como el de W. Lycan (2002), por citar otro trabajo relativamente reciente. En consecuencia, hay que decir que S. Soames cumple muy bien con su objetivo de presentar el devenir de la reflexión sobre el lenguaje de inspiración analítica. Ahora bien, conviene hacer algunas aclaraciones para que el lector que no esté familiarizado con la filosofía del lenguaje no vaya a llamarse a engaño.

En primer lugar, conviene indicar que, aunque suelen iniciarse las exposiciones de la filosofía del lenguaje con la obra de G. Frege, el propio Frege nunca usó el término *filosofía del lenguaje*, si bien el término en cuestión se puede encontrar muy anteriormente, incluso en la obra de J. Balmes (1944).

En segundo lugar, una perspectiva más amplia del tema no puede dejar de tener en cuenta que la reflexión filosófica sobre el lenguaje se puede encontrar a lo largo de toda la historia de la filosofía. Y ello desde el *Cratilo* de Platón, pasando por la filosofía medieval (De Andrés, 1969) o la moderna (Cordemoy, 1989).

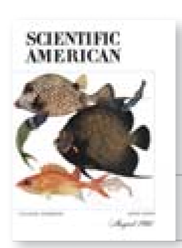
En tercer lugar, sería de esperar que un libro que lleva por título *Philosophy of Language* y que puede utilizarse a modo de manual sea una exposición amplia de las diversas corrientes filosóficas que han reflexionado sobre el lenguaje, al menos las corrientes filosóficas del siglo xx. En realidad, la metonimia del título del libro de S. Soames, al presentar la filosofía del lenguaje de inspiración analítica como *la filosofía del lenguaje*, pudiera inducir a algún lector a pensar que la analítica es *toda* la filosofía del lenguaje del siglo xx. Y hay que decir que existen *otras* filosofías del lenguaje en el siglo xx. Así, por ejemplo, puede hablarse de una filosofía del lenguaje de inspiración marxista (Lecercle, 2004) o fenomenológica (Edie, 1987). Pero incluso se echan de menos referencias a algunos de los grandes hitos de la tradición analítica tales como J. L. Austin o L. Wittgenstein, que ni tan siquiera son nombrados.

En cuarto lugar, dado que la jerga de la filosofía del lenguaje suele ser bastante farragosa para los no especialistas y términos como el de *implicatura*, *modalidad* u *holismo* pueden ser de difícil comprensión, recomiendo al lector no familiarizado con el tema que acompañe la lectura de la obra de Soames con el libro de A. Tanesini (2007), donde encontrará un diccionario temático y onomástico de lo más relevante de la filosofía del lenguaje —aunque, también en este caso, circunscrito a la filosofía del lenguaje de tradición analítica.

En breve, la lectura del libro de S. Soames puede ser de gran utilidad para quien esté interesado en conocer un panorama sucinto de la filosofía (analítica) del lenguaje del siglo xx, aunque debe ser consciente de que hay otras concepciones de la filosofía del lenguaje, lo mismo en el pasado que en la actualidad, que no se hallan recogidas en este libro.

—Pedro José Chamizo Domínguez

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Agosto 1961

Fabricación de polímeros

«Ya han pasado varios años desde que nuestro laboratorio del Politécnico de Milán descubrió los procesos catalíticos "estereoespecíficos" a partir de moléculas asimétricas simples de hidrocarburos tales como el propileno. Los nuevos polímeros "estereorregulares" del propileno obtenidos por nuestro método, y por métodos similares desarrollados con éxito por otros, llevan fabricándose a gran escala en EE.UU. desde principios de este año, a raíz de la finalización de tres grandes plantas el año pasado. En tan solo un año nuestro laboratorio logró que los métodos estereoespecíficos de polimerización avanzaran un paso más y sugirió que variedades aún no conocidas de polímeros estereorregulares cobrarían importancia práctica antes de no muchos años.

—Giulio Natta»

Natta *compartió el premio Nobel de Química de 1968. Esas moléculas se emplean a modo de catalizadores en la producción comercial a gran escala de plásticos y gomas.*



Agosto 1911

Un millón de grandes ideas

«Desprovista de toda pompa y ceremonia, y con una falta de ostentación que parecía inadecuada a la ocasión, la patente que hizo un millón fue publicada el martes, 8 de agosto de 1911. La rueda de la fortuna que señaló al receptor de la patente que haría época —que se concedería a aquella que se situara en la cima del montón, justo después de que la máquina numeradora rebasara el 999.999— decidió a favor de Frank H. Halton, de Cleveland (Ohio), que había solicitado el derecho exclusivo para fabricar y vender un perfeccionamiento de los neumáticos inflables de automóvil. Muy oportuno resulta que esta patente, por sí misma un monumento al progreso, se haya concedido a una mejora de los automóviles.»

Agua y energía

«La recién terminada presa Roosevelt, en el sur de Arizona, contiene unos 270.000 metros cúbicos de mampostería y forma el mayor embalse hoy existente. Su construcción conllevó un gasto de casi 300.000 dólares solo en carreteras; estas permiten el acceso a la región y sustituyen las carreteras públicas sumergidas en el lago artificial.»

El peaje del opio

«El movimiento en contra de la producción de opio en China ha dado lugar a resultados inesperados. En el Yunnan, una de las provincias donde se producía en grandes cantidades, parece que ya no se cultiva la amapola debido a las recientes medidas. Sin embargo, ello ha tenido un efecto desastroso en la apicultura de la región. Al no haber ya flores para las abejas, ha cesado la producción de miel. Los nuevos cultivos que sustituyen la amapola, tales como el trigo o los guisantes, no rendirán unas producciones de miel tan buenas. Por otro lado, la presente legislación no ha eliminado la afición de la población por el opio, tal como algunos supusieron, sino que ha vuelto a crecer.»



La presa Theodore Roosevelt, construida para almacenar agua, controlar las inundaciones y producir electricidad.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CV, N.º 7; 12 DE AGOSTO DE 1911



Agosto 1861

Plomo en el agua

«No hay tema más importante, especialmente para las ciudades que gozan de unas instalaciones de abastecimiento y distribución de agua, que la corrosión del plomo de las cañerías. Todas las sales de plomo son extremadamente tóxicas y, como todos los venenos metálicos, se acumulan en el organismo. Hace tiempo que consideramos necesario revisar, en lo que respecta al empleo de tuberías de plomo para conducir el agua, la idea de que las sales de plomo no se disuelven en el agua. Cuando esta es impulsada a gran velocidad desde gran altura [presión] por un tubo, las partículas granulares de mineral son arrastradas por el líquido, se mezclan en él y, con toda certeza, pasan al organismo como si se hubieran disuelto.»

La Guerra Civil en el mar

«La goleta *S. J. Waring*, que había sido capturada por el buque corsario *Jeff. Davis*, arribó a este puerto el domingo, 21 de julio, tras haber sido recuperada por el camarero negro con la ayuda de uno de los marineros. Cuando el *Waring* fue capturado, el capitán y el oficial de cubierta fueron sacados del barco, pero al camarero de color y a dos de los marineros se les dejó a bordo. El camarero, al descubrir por una conversación que oyó que su apresador, el capitán Amiel, tenía la intención de venderlo como esclavo en cuanto la goleta llegase a Charleston, decidió realizar un intento desesperado para rescatar el barco. El nombre del camarero es William Tillman.»

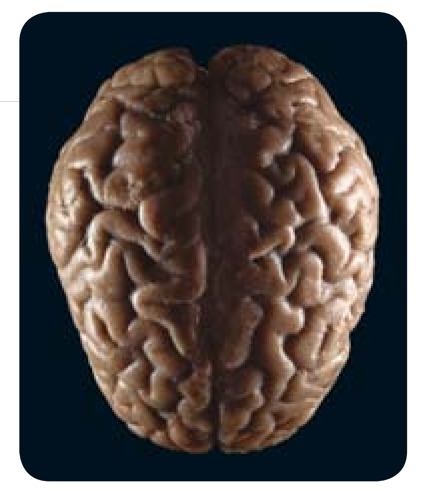


NEUROCIENCIA

Los límites de la inteligencia

Douglas Fox

Puede que las leyes de la física impidan al cerebro humano seguir evolucionando para convertirse en una máquina de pensar cada vez más poderosa.





ASTROFÍSICA

La tabla periódica de las estrellas

Ken Croswell

El diagrama de Hertzsprung-Russell, herramienta esencial de la astrofísica estelar, cumple este año su centenario.

BIOLOGÍA

La evolución del ojo

Trevor D. Lamb

Los científicos tienen ahora una visión clara de cómo llegó a evolucionar nuestro ojo, notablemente complejo.



CAMBIO CLIMÁTICO

El último gran calentamiento global

Lee R. Kump

El calentamiento global más abrupto de la historia terrestre fue mucho más lento que el actual. El evento supone un ejemplo didáctico para afrontar nuestro futuro.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti,
Christine Gorman, Anna Kuchment,
Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS
Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER
MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados
es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Daniel Cremades: *Vivir en un mundo cuántico*; Joandomènec Ros: *El cáncer del diablo, La buchada perfecta* y *De cerca*; J. Vilardell: *Prepararse para el cisne negro* y *Hace...*; Luis Bou: *Consciencia artificial* y *Carne de laboratorio*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Sintiendo el calor*; Fabio Teixidó: *Las aguas artesianas de Dilmún, Me atengo a la ciencia* y *Un meteorólogo en la segunda planta*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España